

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra informatiky

Automatizace kalibrace magnetometrů v laboratoři

Automatic Calibration of Magnetometers in Lab

Zadání bakalářské práce

Student: **Vítězslav Částka**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2612R025 Informatika a výpočetní technika

Téma: **Automatizace kalibrace magnetometrů v laboratoři**
Automatic Calibration of Magnetometers in Lab

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Navrhněte automatizované kalibrační pracoviště pro navázání ručních magnetometrů na etalon schválený ČMI. Použijte ampérmetr s digitálním výstupem pro automatické nastavování kalibračního bodu. Automatizujte nastavování výstupního napětí zdroje při kolísání proudu. Navrhněte způsob automatizovaného odečtu hodnot z ručního magnetometru během kalibrace pomocí kamery. Výstupem měření bude záznam všech sledovaných hodnot o průběhu kalibrace ve formě naměřených dat i obrazových informací.

1. Seznamte se s problematikou technického řešení kalibračního pracoviště.
2. Navrhněte způsoby automatizace jednotlivých činností během kalibrace. Navrhněte způsob záznamu obrazových informací v odpovídající kvalitě pro následné rozpoznání naměřených hodnot.
3. Navržené principy realizujte dle potřeby technicky nebo programově.
4. Ověřte činnost jednotlivých zařízení samostatně.
5. Otestujte činnost celého kalibračního pracoviště.
6. Zhodnoťte dosažené výsledky, porovnejte výsledky s dosud používaným postupem.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. ČSN EN ISO 9934-1, Zkoušení magnetickou práškovou metodou - Část 1: Všeobecné zásady
2. ČSN EN ISO 9934-2, Zkoušení magnetickou metodou práškovou - Část 2: Zkušební prostředky
3. ČSN EN ISO 9934-3, Zkoušení magnetickou metodou práškovou - Část 3: Přístroje
4. Technická dokumentace počítače Raspberry PI, <http://www.raspberrypi.org>
5. Technická dokumentace programovatelného dvoukanálového DC zdroje PSM-2010/3004/6003, výrobce Good Will Instrument Co., Ltd.
6. Technická dokumentace digitálního multimetru RIGOL DM3058.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Olivka, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 28.04.2017



doc. Dr. Ing. Eduard Sojka
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 27. dubna 2017



.....

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě 27. dubna 2017



.....

Abstrakt

Tato práce obsahuje popis vývoje Windows Form, která zjednodušuje a urychluje postup kalibrace ručního měřiče magnetického pole. Pro srovnání byl proveden popis pracovního postupu samotné skutečné kalibrace a nového postupu s vyvinutou aplikací. Jsou zde popsány jednotlivé části programu, který ovládá měřicí pracoviště společně s popisem možných úskalí, na které lze při vývoji takovéto aplikace narazit. Práce zahrnuje jak část GUI, tak část o vícevláknovém programování a komunikaci s přístroji přes sériový port RS-232.

Klíčová slova: OCR, rozpoznávání znaků, kalibrace, automatizace, RS-232, magnetické pole

Abstract

This thesis contains a description of developing a Windows Form application and the application itself, which makes the process of the calibration of a hand magnetometer quicker and also simpler. I have made description of workflow of a real calibration process and for comparison also the description of new workflow with utilization of the application. Every part of the application, that controls the measuring station, is described along with problems that can possibly occur while developing a similar application. Thesis includes part of graphical preprocess and also part of multithreading and communication through serial port RS-232

Key Words: OCR, character recognition , calibration, automation, RS-232, magnetic field

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
1 Úvod	11
2 Seznámení s problematikou technického řešení kalibračního pracoviště	12
2.1 Kalibrace magnetometru	15
3 Návrh automatizace kalibrace	17
3.1 Potřebné funkce	17
3.2 Čtení hodnot naměřených multimetrem	18
3.3 Nastavení proudu a napětí na zdroji	19
3.4 Odesílání příkazů a připojení přístrojů	21
3.5 Zapojení pro měření	21
3.6 Často nastavované hodnoty	22
3.7 Omezení přístrojů a metody	23
4 Programová a technická realizace	25
4.1 Popis tříd	27
4.2 Uživatelské rozhraní	30
4.3 Funkce aplikace	32
4.4 Zpracování obrazu	36
4.5 Zpracování obrazu pomocí Tesseract OCR	41
5 Testování činnosti jednotlivých přístrojů	44
5.1 Zdroj napětí a proudu	44
5.2 Multimetr	44
6 Testování celého kalibračního pracoviště	45
6.1 Porovnání	45
7 Závěr	48
Literatura	49

Seznam použitých zkratek a symbolů

TIFF	– Tagged Image File Format
OCR	– Optical Character Recognition
HD	– High Definition
GPIB	– General Purpose Interface Bus
LCD	– Liquid Crystal Display
ČMI	– Český Metrologický Institut
GUI	– Graphical User Interface
API	– Application Programming Interface
CR	– Carriage Return
LF	– Line Feed

Seznam obrázků

1	Schémata zapojení kalibračního pracoviště	13
2	Ukázka pracoviště	14
3	Excel tabulka pro měření	14
4	Graf odchylky z Excel souboru	15
5	Excelová tabulka pro zápis údajů o přístroji a vlastností prostředí	16
6	Výsledná tabulka tisknutá v kalibračním listu	16
7	Třídní diagram	26
8	Ukázka logu	28
9	Původní ovládací panel	30
10	Nový ovládací panel	31
11	Ikona aplikace	31
12	Vývojový diagram měření VA charakteristiky	33
13	Vývojový diagram Auto Voltage	34
14	Vývojový diagram Continuous Measurement	35
15	Vývojový diagram Preset Sequence	36
16	Okno CameraCapture	37
17	Originální snímek z webkamery	37
18	Vyhlazený snímek převedený do stupňů šedi	38
19	Snímek zpracovaný funkcí AdaptiveThreshold	38
20	Snímek zpracovaný metodou CannyEdges	39
21	Snímek s nalezeným obdélníkem	41
22	Výřez snímku pro OCR	41
23	Ostrý font	42
24	Rozmazaný/propojený font	42
25	Výstup měření	46
26	Ukázka nového pracoviště	46

Seznam tabulek

1	Rozsahy pro měření DC napětí	19
2	Rozsahy pro měření AC napětí	19
3	Rozsahy pro měření AC proudu	19
4	Rozsahy pro měření DC proudu	19
5	Kalibrační body 1	23
6	Kalibrační body 2	23

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je navrhnout automatizované kalibrační pracoviště pro navázání ručních magnetometrů na etalon schválený ČMI. Použiji ampérmetr s digitálním výstupem pro automatické nastavování kalibračního bodu. Automatizuji nastavování výstupního napětí zdroje při kolísání proudu. Navrhnou způsob automatizovaného odečtu hodnot z ručního magnetometru během kalibrace pomocí kamery. Výstupem měření bude záznam všech sledovaných hodnot o průběhu kalibrace ve formě naměřených dat i obrazových informací. Obsahem této práce bude seznámení s problematikou kalibrace ručních magnetometrů, postup návrhu automatizace jednotlivých činností a specifikace požadavků. Poté popíši samotnou realizaci technických a programových částí. Po ověření činnosti jednotlivých zařízení bude otestováno pracoviště jako celek. V závěru bude provedeno srovnání časové náročnosti původní metody a nového automatizovaného postupu.

2 Seznámení s problematikou technického řešení kalibračního pracoviště

Současné pracoviště pro kalibraci magnetometru se sestává z několika přístrojů:

- Multimetr Rigol DM3058,
- DC zdroj GW Instek PSM-6003,
- Helmholtzova cívka,
- Autotransformátor,
- Bočník pro akreditované kalibrace.

Tyto přístroje jsou zapojené podle měřeného rozsahu a postupu kalibrace. Pro akreditované metody se zapojení liší měřením úbytku napětí na bočníku, místo přímého měření proudu. Schémata zapojení lze vidět na obrázku 1.

Multimetr Rigol DM3058, bočník a Helmholtzova cívka jsou kalibrované přístroje. Jsou navázané na vyšší etalony, jelikož jejich hodnoty jsou využívány pro výpočet měřených hodnot. Multimetr zobrazuje proud protékající cívkou, který je pak pomocí přepočtového koeficientu Helmholtzovy cívky přepočten na magnetické pole v cívce. Koeficient je změřen a vypočítán z charakteristiky změřené při navázání cívky na vyšší etalon v ČMI. Rovnici (1) znázorňuje příklad výpočtu pro neakreditovanou kalibraci. Rovnice (2) pak ukazuje výpočet výsledku akreditovaného měření.

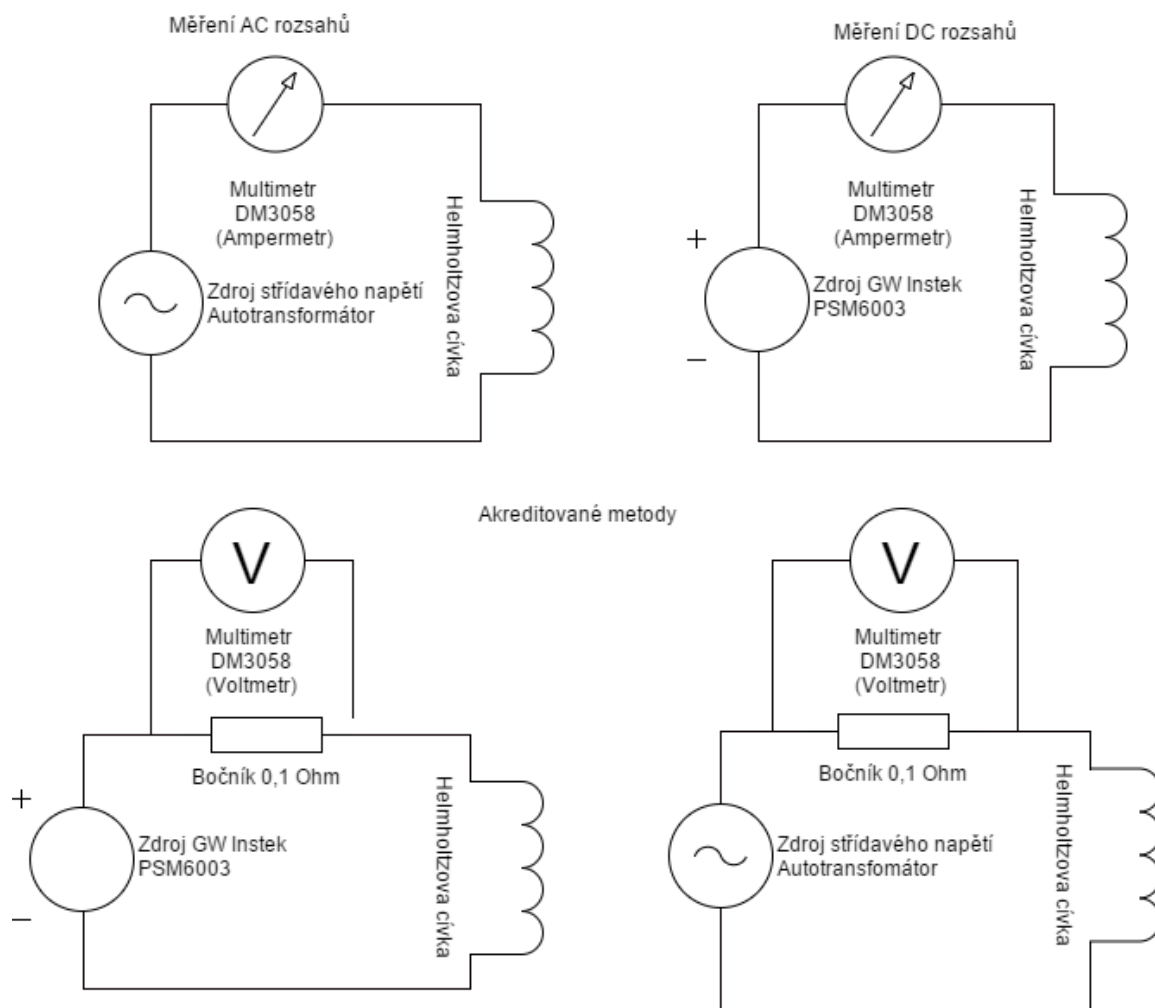
$$H_t = I \times 6749,60198158419 \quad (1)$$

$$H_t = \frac{U}{0.1000165} \times 6749,60198158419 \quad (2)$$

V praxi se při ručním měření nepřepočítává každá hodnota proudu zvlášť, ale je využívána tabulka nejčastěji měřených hodnot, dle které je nastaven proud. Tyto hodnoty poté proměříme zkoušeným magnetometrem a zapíšeme je do Excel tabulky na obrázku 3. Tento Excel soubor je vytvořen pro usnadnění měření a ověření případných překlepů nebo nesprávných hodnot. Podmíněným formátováním je zajištěna kontrola všech buněk s měřenými hodnotami. Pro názorné zobrazení linearitu rozsahu pak ve spodní části listu najdeme graf (obrázek 4).

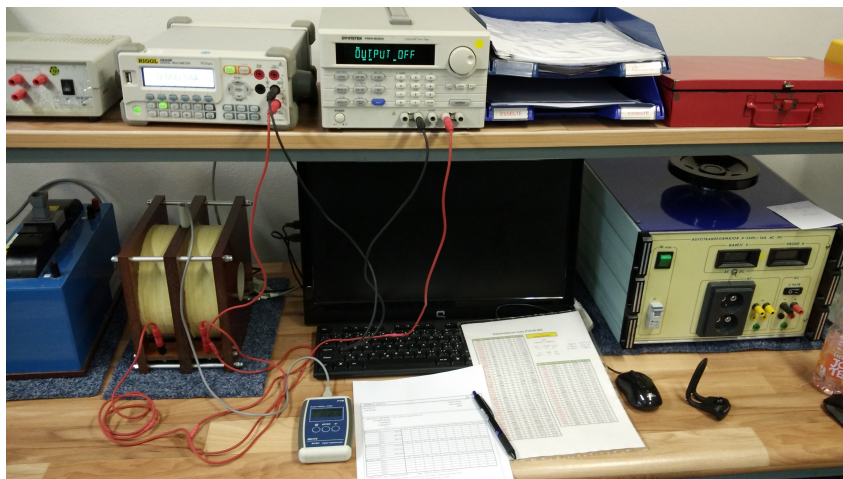
Kalibrace magnetických přístrojů probíhá kvůli nedestruktivnímu zkoušení materiálů. Výrobky testované práškovou metodou je třeba ověřovat kalibrovanými přístroji. V opačném případě ověřování nemá oficiálně žádnou vypovídající hodnotu. Při samotném zkoušení je každý výrobek zmagnetován elektrickým proudem a následně pokryt fluorescentním magnetickým práškem. Pracoviště nebo samotný výrobek je osvětlen UV světlem ve spektru 365 nm. Pokud je na výrobku trhлина či prasklina ovlivní to magnetické pole kolem výrobku. Tento bod přitáhne větší

Neakreditované metody



Obrázek 1: Schémata zapojení kalibračního pracoviště

množství magnetického fluorescentního prášku. Pro kontrolu zmagnetování výrobku, nalezení anomálie v magnetickém poli výrobku a nebo zbytkového magnetizmu na výrobku se pak používá zkalibrovaný magnetometr. Podrobnější informace popisují normy ČSN EN ISO 9934-1,2,3 [6, 7, 8]. *Tato evropská norma specifikuje všeobecné zásady pro zkoušení feromagnetických materiálů magnetickou práškovou metodou. Magnetická prášková metoda se především používá pro zjišťování otevřených povrchových vad, především trhlin. Může také zjistit vady těsně pod povrchem, avšak citlivost klesá s narůstající hloubkou [6]. Tato norma specifikuje přípravu povrchu zkoušené součásti, techniky magnetizace, požadavky a použití detekčních prostředků a zaznamenání a interpretaci výsledků. Kritéria přípustnosti zde nejsou definovány. Doplňující požadavky na zkoušení magnetickou práškovou metodou se stanoví v normě výrobku (viz odpovídající EN norma). Tato norma se nepoužívá u technik zbytkové magnetizace. Norma ISO 9934-2 specifikuje*



Obrázek 2: Ukázka pracoviště

Rozsah přístroje:	Etalonová hodnota:	4000 A/m	10000 A/m	18000 A/m
20000				
DC				
		1 4020 A/m	1 10000 A/m	1 17980 A/m
		2 4020 A/m	2 10000 A/m	2 17980 A/m
		3 4010 A/m	3 10000 A/m	3 17980 A/m
		4 4010 A/m	4 10000 A/m	4 17980 A/m
		5 4010 A/m	5 10000 A/m	5 17980 A/m
		1 -4010 A/m	-1 -9990 A/m	-1 -17970 A/m
		2 -4010 A/m	-2 -9990 A/m	-2 -17970 A/m
		3 -4010 A/m	-3 -9990 A/m	-3 -17970 A/m
		4 -4010 A/m	-4 -9990 A/m	-4 -17970 A/m
		5 -4010 A/m	-5 -9990 A/m	-5 -17970 A/m
	Výběrový průměr (+):	4014 A/m	10000 A/m	17980 A/m
	Výběrový průměr (-):	-4010 A/m	-9990 A/m	-17970 A/m
	Nejistota měření (+):	2,45	0,00	0,00
	Nejistota měření (-):	0,00	0,00	0,00
	Poměrná chyba(+):	0,35	0,00	0,11
	Poměrná chyba(-):	0,25	0,10	0,17
	Poměrná chyba se znaménkem:	0,35	0,00	-0,11
	Maximální povolená odchylka:	200 A/m	500 A/m	900 A/m
	Rozšířená nejistota měření pro k=2:	0,4%	0,3%	0,3%

Přesnost	NH	MR	Dig	Res
Rozsah 1	5%	0%	0	10
Rozsah 2	5%	0%	0	0
Rozsah 3	5%	0%	0	0

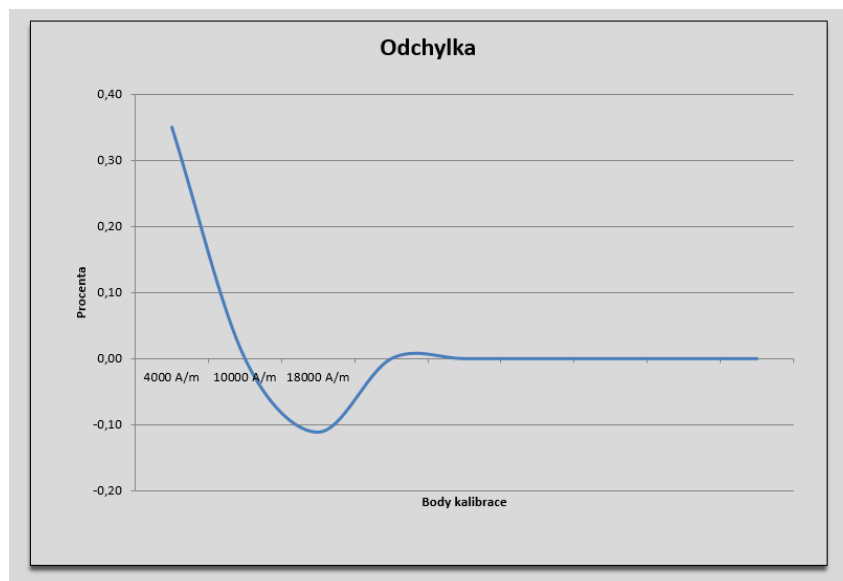
Nejistoty typu A	uA1	uA2	uA3
[A/m]	[A/m]	[A/m]	[A/m]
2,44948974	0	0	0
0	0	0	0

Rozšířené nejistoty rozsahů 1-3 pro k=2	U1	U2	U3
[%]	[%]	[%]	[%]
0,37	0,37	0,37	0,37

Redukované poměrné chyby jednotlivých rozsahů	d1[%]	d2[%]	d3[%]
0,35	0,35	0,35	0,35

Obrázek 3: Excel tabulka pro měření

významné vlastnosti přípravků pro zkoušení magnetickou práškovou metodou (včetně magnetické suspenze, prášku, nosné kapaliny, kontrastních pomocných nátěrů) a metody pro kontrolu jejich vlastností [7]. Nejdůležitější je pro samotnou kalibraci třetí část, která popisuje ruční nebo mobilní přístroje, stacionární zařízení a specializované zkušební systémy pro kontinuální zkoušení magnetickou metodou práškovou. Popisuje technické údaje a minimální požadavky na jednotlivé magnetizační přístroje a specifikuje vlastnosti přístrojů požadované na dodavateli zařízení, na inspekční kabiny a požadavky na odmagnetování. Zabývá se měřením proudu, magnetického pole, měřením viditelného světla a UV-A záření v návaznosti na další evropské normy. Uvádí rovněž požadavky na bezpečnost a životní prostředí a požadavky na ověřování a kalibraci měřicích přístrojů. Předmětem této normy nejsou požadavky z hlediska přípustnosti vad a norma neuvádí žádná kritéria přípustnosti [8].



Obrázek 4: Graf odchyly z Excel souboru

2.1 Kalibrace magnetometru

Současný průběh samotné kalibrace magnetometru se řídí dle postupu kalibrační laboratoře 04-53/32 [9]. *Tento postup se vztahuje na kalibraci číslicových měřičů magnetického pole následujících funkcí, dovolených chyb, rozsahů a jednotek, určených k měření intenzity magnetického pole a magnetické indukce u nichž se z hlediska funkce nevyžaduje přesnost měření větší než 5 % u stejnosměrných rozsahů a větší než 5 % u střídavých rozsahů* [9]. Ve zjednodušené praxi vypadá tento postup následovně. :

1. Zapišeme údaje o přístroji jako jsou typ, sériové číslo popřípadě evidenční číslo. Toto vše zapisujeme již do excelového listu (obrázek 5).
2. Dle blokového schématu zapojíme do série DC zdroj, Helmholtzovu cívku a multimetr ve funkci ampérmetru.
3. Vynulujeme magnetometr při vložení magnetické sondy do nulového pole. Do Helmholtzovy cívky vložíme sondu magnetometru tak, aby senzorem (Hallovou sondou) procházely magnetické siločáry pole cívky kolmo.
4. Na DC zdroji nastavíme hodnotu dle tabulky přepočtených nejčastěji kalibrovaných hodnot, a nebo použijeme koeficient cívky k získání přesné hodnoty proudu pro požadovanou hodnotu magnetického pole (tento proces je poměrně zdlouhavý a ne dokonale přesný).
5. Odečteme hodnotu z displeje kalibrovaného magnetometru.
6. Vypneme výstup zdroje, abychom zkontrolovali, zda přístroj ukazuje při nulovém poli opravdu nulu, nebo hodnotu v rozmezí -0,03 kA/m až +0,03 kA/m

7. Znovu zapneme výstup zdroje. V případě, že hodnota proudu zobrazená na multimetru se neshoduje s tabulkovou, je nutné hodnotu donastavit a pak pokračujeme bodem 3. V případě že je hodnota stejná jako první nastavená, pokračujeme bodem 4.
8. Toto měření s kontrolou nuly provedeme 5 krát pro kladné magnetické pole a po přehození vstupů cívky 5 krát pro záporné magnetické pole.
9. Hodnoty přepíšeme z papíru do Excel souboru připraveného pro výpočet odchylek, nejistot měření, vyhodnocení a pro vystavení kalibračního listu.

Přesné naměřené hodnoty jsou pro neakreditovanou kalibraci uloženy pouze v elektronické podobě v daném Excel souboru. Pro akreditovanou metodu se zakládá záznam o měření v tištěné podobě. Protokol pro obě metody obsahuje průměrné hodnoty pro každý kalibrační bod s vypočtenými nejistotami a chybami, jak lze vidět na obrázku 6.

Měřil:	Vítězslav Částka
Datum kalibrace:	21.4.2017
Postup:	04-53/32
Protokol vystavil:	Vítězslav Částka
Datum vystavení:	16.4.2017
Teplota:	24
Vlhkost:	40
Číslo protokolu:	77
Počet listů	
kód sestavy	MH 07
Výrobce:	PTS Josef Solnař
S/N:	214545
Evidenční číslo:	

Typ sondy:	-
Výrobce sondy:	-
SN sondy:	-
Evid. číslo sondy:	-

Použité měřidlo 1	Helmholtzova cívka
Použité měřidlo 2	Multimetr DM 3058E
Použité měřidlo 3	-

Obrázek 5: Excelová tabulka pro zápis údajů o přístroji a vlastností prostředí

DC ROZSAH 1.	od 0 A/m do 20000 A/m, přesnost přístroje: 5%					vyhovuje
Etalonová hodnota	4 000	10 000	18 000	-4 000	-10 000	-18 000
Naměřená hodnota	4 014	10 000	17 980	-4 010	-9 990	-17 970
Chyba	0,35%	0,00%	0,11%	0,25%	0,10%	0,17%
Nejistota měření	0,37%					

Obrázek 6: Výsledná tabulka tisknutá v kalibračním listu

3 Návrh automatizace kalibrace

Cílem této bakalářské práce je zjednodušit celý postup. Především bod nastavování a bod odečítání hodnoty z displeje jsou příčinou dlouhého trvání procesu kalibrace. K dosažení cíle je nutné zvolit programovací jazyk vhodný pro tuto aplikaci a způsob komunikace s přístroji. Vzhledem k tomu, že aplikace bude jistě potřebovat GUI, bude ideální vytvořit Windows Form aplikaci v jazyce C#. Oba přístroje, které jsou na pracovišti, disponují sériovým portem RS-232. Většina průmyslových strojů pracuje s GPIB a nebo RS-232. Proto také průmyslové počítače obsahují několik RS-232 výstupů. Pro testování, debugging a simulace lze využít aplikaci VSPE, která emuluje pár sériových portů a aplikaci Termite, která bude zobrazovat přijímaná data, případně po připojení přístroje bude ručně zasílat příkazy zdroji a multimetru. Pro reálné zapojení lze využít standardní redukce USB na RS-232. K odečítání hodnot z displeje kalibrovaného přístroje bude pořízena web kamera, která zvládá snímání obrazu v HD rozlišení. Pro rozpoznání znaků na displeji měřeného přístroje využijeme open source OCR aplikaci Tesseract.

Cílem je zjednodušit kalibraci na tyto body:

1. Zapišeme údaje o přístroji.
2. Dle blokového schématu zapojíme do série DC zdroj, helmholtzovu cívku a multimetr ve funkci ampérmetru.
3. Vynulujeme magnetometr při vložení magnetické sondy do nulového pole. Do helmholtzovy cívky vložíme sondu magnetometru tak aby Hallovou sondou, procházely magnetické siločáry pole cívky kolmo.
4. Namíříme web kameru na displej magnetometru, spustíme aplikaci vytvořenou pro kalibraci magnetometrů a v ní spustíme samotnou kalibraci. V případě více rozsahů je nutný fyzický zásah do procesu a přepnutí rozsahů na měřeném přístroji.
5. Vložení naměřených hodnot do Excel souboru a vystavení protokolu.

3.1 Potřebné funkce

Pro správnou funkci aplikace využijeme několik základních funkcí multimetru a DC zdroje.

1. Čtení hodnot naměřených multimetrem AC i DC proud a napětí.
2. Nastavení proudu a napětí DC zdroje.
3. Limitace proudu a napětí DC zdroje.
4. Spínání výstupu zdroje a zjišťování stavu výstupu.

3.2 Čtení hodnot naměřených multimetrem

Pro nastavení hodnot dle kalibračního listu cívky, která je společně s multimetrem navázána na vyšší etalon, je nejprve nutné probrat potřebné příkazy pro odečítání veškerých hodnot z digitálního multimetru. Firma zakoupila pro tento účel multimetr Rigol DM3058, který komunikuje přes rozhraní RS-232.

Specifikace [1]

- Napájení - AC 100 V \sim 120 V, 45 Hz \sim 440 Hz nebo AC 200 V \sim 240 V, 45 Hz \sim 66 Hz
- Spotřeba - 20 VA špičková hodnota
- Displej - 256×64 px LCD
- Podmínky prostředí:
 - Přesné 0 - 50 °C, 80% R.H. při 40 °C
 - Skladovací -20 - 70 °C
- Dálkové ovládání - GPIB, 10/100 Mbit LAN, USB 2.0 (Podporuje flash disk), RS-232.
- Programovací jazyk - RIGOL DM3058 SCPI, Fluke 45, Agilent 34401A.

Na webové stránce výrobce jsou k dispozici jak klasické manuály se specifikací tak příručka k programování se všemi příkazy. Pro náš účel je zbytečné využívat drivery pro labView, proto použijeme příručku [1] s příkazy a vybereme z ní ty nejdůležitější.

- Příkaz :MEAS?
- Funkce vrací hodnotu TRUE nebo FALSE pokud jsou, resp. nejsou nová data k dispozici.

Příkaz se zdá být důležitý, avšak je ve výsledku nevyužitelný. Ve chvíli kdy si po multimetru vyžádáme naměřenou hodnotu z jakéhokoliv rozsahu, nejprve se musí odeslat návratová hodnota a až poté je možno odeslat další příkaz. Ověřovací příkaz by byl využitelný pouze v případě Single měření. Vzhledem k tomu, že potřebujeme měřit trvale a s pokud možno co nejrychlejší odezvou, nebudeme jej využívat vůbec. Single měření s ověřením dostupných dat by bylo elegantní řešení pro synchronizaci, avšak kvůli již zmíněné špatné funkci tohoto příkazu, bude nutno využít pevné časové konstanty pro prodlevu mezi jednotlivými měřeními. Funkce :MEAS však obsahuje potřebná rozšíření, která potřebujeme pro měření.

- : MEAS : VOLT : DC? - měření napětí v DC rozsahu
- : MEAS : VOLT : AC? - měření napětí v AC rozsahu

MEAS:VOLT:DC{}		
0	200 mV	100 nV
1	2 V	1 μ V
2	20 V	10 μ V
3	200 V	100 μ V
4	1000 V	1 mV
MIN	200 mV	100 nV
MAX	1000 V	1 mV
DEF	20 V	10 μ V

Tabulka 1: Rozsahy pro měření DC napětí

MEAS:VOLT:AC{}		
0	200 mV	100 nV
1	2 V	1 μ V
2	20 V	10 μ V
3	200 V	100 μ V
4	1000 V	1 mV
MIN	200 mV	100 nV
MAX	750 V	1 mV
DEF	20 V	10 μ V

Tabulka 2: Rozsahy pro měření AC napětí

MEAS:CURR:AC{}		
0	20 mA	100 nA
1	200 mA	1 μ A
2	2 A	10 μ A
3	10 A	100 μ A
MIN	200 μ A	1 nA
MAX	10 A	100 μ A
DEF	200 mA	1 μ A

Tabulka 3: Rozsahy pro měření AC proudu

MEAS:CURR:DC{}		
0	200 μ A	1 nA
1	2 mA	10 nA
2	20 mA	100 nA
3	200 mA	1 μ A
4	2 A	10 μ A
5	10 A	100 μ A
MIN	200 μ A	1 nA
MAX	10 A	100 μ A
DEF	200 mA	1 μ A

Tabulka 4: Rozsahy pro měření DC proudu

- : *MEAS : CURR : DC?* - měření proudu v DC rozsahu
- : *MEAS : CURR : AC?* - měření proudu v AC rozsahu

Tyto funkce navrátí hodnotu proudu resp. napětí ve specifickém formátu, například: 8,492853e-05. Pro akreditované měření magnetometrů jsou dané rozsahy, ve kterých je nutno měřit danou hodnotu kvůli správnému výpočtu nejistot. Proto využijeme i funkci nastavení a zjištění rozsahu multimetru.

- : *MEAS : VOLT : DC2* - Nastaví druhý rozsah měření napětí.
- : *MEAS : VOLT : DC : RANG?* - Po tomto příkazu multimetr navrátí hodnotu 2, jelikož jsme předchozím příkazem nastavili rozsah na druhý.

V tabulkách 1, 2, 3 a 4 najdeme přehled rozsahů pro měření napětí a proudu.

3.3 Nastavení proudu a napětí na zdroji

Jako zdroj stejnosměrného napětí využíváme ve firmě zdroj GW Instek PSM-6003, který poskytuje například dva rozsahy napětí (60V a 30V) a velmi precizní nastavení napětí s rozlišením 2mV. Tímto lze zajistit velmi přesné nastavení potřebného napětí. Taktéž komunikuje přes RS-232 a na webu je k němu dostatečná specifikace i s příručkou k programování s veškerými příkazy.

Vlastnosti DC zdroje [2]

- Jeden výstup s dvěma rozsahy, max. 200 W,
- Vysoké rozlišení regulace: 1 mV/1mA,
- 100 pamětí pro nastavení parametrů zdroje,
- Automatické krokování s časovačem,
- Bezpečnost: OVP, OCP a OTP, s nastavením zpoždění,
- Self-test a kalibrace softwaru,
- Zřetelný vakuovo-fluorescentní displej,
- Přední a zadní výstupní terminál,
- Standardní interface RS-232C, GPIB.

Nastavení napětí

- *VOLT*5,2546 – nastaví výstupní napětí na 5,2546 V
- Pro kontrolu je vhodné zeptat se zdroje, jakou nastavil hodnotu pomocí příkazu: *VOLT*?
Která navrátí double hodnotu v rozsahu 0,0000 V až 20,6000 V.
- *CURR*6,0000 – Nastaví hodnotu maximálního výstupního proudu na 6 A
- Stejně jako u napětí lze ověřit, zda byl příkaz proveden pomocí *CURR*?

Nastavení limitace proudu a napětí

- *CURR* : *PROT*6,6 – Nastaví Over Current Protection (OCP) na 6,6 A
- *VOLT* : *PROT*30 – Nastaví Over Voltage Protection (OVP) na 30 V
- Limitace proudu a napětí je třeba nastavit na tyto hodnoty (6,6 A a 30 V), aby nedocházelo k odpojování zdroje při měření a nutnému resetu OVP nebo OCP. Ochrana proti nastavení nesmyslného napětí na zdroji (60 v například) bude řešena v aplikaci.

Spínání výstupu zdroje a zjišťování stavu výstupu:

- *OUTP* : *STAT*1 – Sepne výstup zdroje.
- *OUTP* : *STAT*0 – Odpojí výstup zdroje.
- *OUTP* : *STAT*? – Vráti hodnotu 1 nebo 0
- Pro simulaci přepínače pomocí softwarového tlačítka v GUI aplikace nejprve zjistí stav výstupu a poté zjištěnou hodnotu neguje.

Tyto hlavní příkazy jsou dostačující pro všechny funkce, které budeme pro měření využívat.

3.4 Odesílání příkazů a připojení přístrojů

Odesílání příkazů přes sériovou linku je realizováno metodami knihovny *System.IO.Ports*, která obsahuje vše potřebné pro nalezení dostupných portů, připojení, odesílání a příjem příkazů. Každý přístroj má individuální nastavení komunikace. Multimetr má nastavitelnou rychlost sériové linky - Baudrate (4800 je dostačující). Znak ukončení příkazu přidáný na konec příkazu je pro multimetr CR LF a pro zdroj pouze CR. Zdroj napětí má nastavitelnou pouze rychlost přenosu. Baudrate je třeba nastavit stejný na přístrojích a v aplikaci. Pro nalezení všech dostupných portů je třeba v aplikaci pomocí metody spouštěné timerem sledovat změny v připojených zařízeních. Nalezené dostupné porty se poté zobrazí v nabídkách. Při prvním připojení přístrojů je nutno provést identifikaci portů. V okamžiku připojení špatného přístroje aplikace zobrazí chybové hlášení a uživatel může zkusit připojit druhý COM port. Pokud by se tento proces musel opakovat často, nebo by docházelo k častým změnám přístrojů na pracovišti, určitě by bylo vhodné automatizovat kontrolu typu přístroje před připojením. Vzhledem k tomu, že však pracoviště zůstává po dobu několika let neměnné, postačí pouze uložit minulé nastavení portů a po startu aplikace jej znovu vyvolat a rovnou přístroje připojit.

```
private void FindAvailablePorts()
{
    string[] AvailablePorts = SerialPort.GetPortNames();
    if (COMComboBox.Items.Count != AvailablePorts.Length){
        this.COMComboBox.Items.Clear();
        this.COM2ComboBox.Items.Clear();
        try{
            for (int a = 0; a < AvailablePorts.Length; a++){
                COMComboBox.Items.Add(AvailablePorts[a]);
                COM2ComboBox.Items.Add(AvailablePorts[a]);
            }
        }
        catch (Exception ex)
        {
            MessageBox.Show(ex.Message);
        }
    }
}
```

3.5 Zapojení pro měření

Pro standardní neakreditovanou kalibraci se využívá multimetr Rigol DM3058 jako ampérmetr zapojený do série se spotřebičem, tedy cívkou. Při kalibraci stejnosměrných rozsahů je připojen

zdroj stejnosměrného napětí GW Instek PSM-6003. Je nutné měřit obě polaritu magnetického pole, proto přepínáme polaritu proudu procházejícího cívkou pomocí prohození vodičů připojených k helmholtzově cívce. k měření střídavého magnetického pole o frekvenci 50/60Hz je připojen autotransformátor. Protože napěťový skok autotransformátoru je příliš velký, pro kalibraci nízkých rozsahů je přiřazen na výstup autotransformátoru také malý transformátor s poměrem 1/10, který sníží rozsah napětí autotransformátoru a zvýší tak přesnost při nastavování nízkých hodnot. Pro akreditovanou kalibraci jsou využity téměř totožné postupy, avšak místo měření proudu je na místo ampérmetru do obvodu zapojen rezistor-bočník (kalibrovaný etalon) a multimetr Rigol je v tomto případě připojen paralelně k rezistoru. Schéma zapojení lze vidět na obrázku 1 Měření úbytku napětí na kalibrovaném rezistoru zaručíme přesnější výsledek s menší a snadněji vypočitatelnou nejistotou. Tento postup byl zaveden začátkem roku 2016 po úspěšné akreditaci kalibrace magnetometrů. Obě měření jsou řízena přepočtovým koeficientem, vypočteným z magnetického pole v cívce a obvodem protékajícího proudu nebo úbytku napětí na kalibrovaném rezistoru. Reálné koeficienty jsou následující:

- Hodnota rezistoru: 0.1000165 Ohm,
- přepočtový koeficient pro proud: 6749,60198158419,
- přepočtový koeficient pro úbytek napětí na bočníku: AC 6747,10555252975,
- přepočtový koeficient pro úbytek napětí na bočníku: DC 6748,48848098483.

3.6 Často nastavované hodnoty

Většina měřených přístrojů má rozsah od 0 do 20000 A/m. Přístroje, u kterých je jejich základní jednotka Gauss, jako například magnetometry americké firmy F.W. Bell, které měří v rozsahu od 0 do 23880 A/m. Všechny přístroje měříme v každém rozsahu ve třech kalibračních bodech tak abychom pokryli celý rozsah pokud možno rovnoměrně. Pro každý bod kalibrace provádíme pět měření v kladné polaritě magnetického pole a pět měření v záporné polaritě. Je kladen důraz na kontrolu nulového bodu. Magnetometr by měl ukazovat hodnotu 0, pokud cívkou neprotéká žádný proud. S problémem udržení nulového bodu se lze často setkat u zahraničních přístrojů. Přestože je jejich cenová kategorie vyšší, v měření hodnot nízkých jsou často méně přesné než výrobky firmy PTS. Tento problém s posouvající se nulou lze vyřešit vyžádáním doladění pomocí chybové hlášky aplikace, nebo pouhým započítáním posunu do výsledku měření. Vzhledem k předpokládané rychlosti měření aplikace by tato vlastnost neměla způsobovat větší odchylky než 0,02 kA/m. Při měření střídavého magnetického pole provádíme pouze pět měření v každém bodě. Většina měřených přístrojů je nastavitelná. Pro doladění přístroje na správnou hodnotu je však nutný zásah do vnitřku přístroje. Ten však může být stejný nebo rozdílný pro AC resp. DC magnetické pole. Pokud je nastavení rozsahu společné, často se projevuje značná odchylka v AC rozsahu oproti referenčním hodnotám. V aplikaci by měla být pro AC rozsah zvýšená tolerance měření. Pro akreditovanou metodu je měření zpřísněno přesnějším kalibračním

Tabulka 5: Kalibrační body 1

Měřené hodnoty pro neakreditované kalibrace									
Typ přístroje	Rozsah 1			Rozsah 2			Rozsah 3		
MH 05	400	1000	1800	4000	10000	18000	20000	25000	35000
F.W. Bell 5180	4000	10000	18000	50000	100000	150000			
F.W. Bell 5170	4000	10000	15000	25000	10000	150000			

Tabulka 6: Kalibrační body 2

Měřené hodnoty pro neakreditované kalibrace									
Typ přístroje	Rozsah 1			Rozsah 2			Rozsah 3		
MH 05	400	1000	1800	4000	10000	18000	20000	25000	35000
F.W. Bell 5180	4000	10000	18000						
F.W. Bell 5170	4000	10000	15000						

postupem, kdy volíme v každém rozsahu kalibrační body 10%, 50% a 90% z maximální hodnoty rozsahu. Jsou případy, kdy zákazník požaduje výjimečně nízké nebo konkrétní hodnoty v rozsahu, případně měření rozsahu ve více než třech bodech. I těmto požadavkům lze vyhovět, ale je nutné je stejně jako všechny ostatní měření řádně zaznamenat pro následující kalibrace. Konkrétní nejčastější případy lze vidět v tabulkách 5 a 6.

Pro tyto přístroje lze sepsat seznam a vytvořit soubory obsahující přednastavené hodnoty předpřipravené pro kalibraci. Později tyto přednastavené hodnoty (kalibrační body) využijeme pro sekvenční měření celých rozsahů přístrojů.

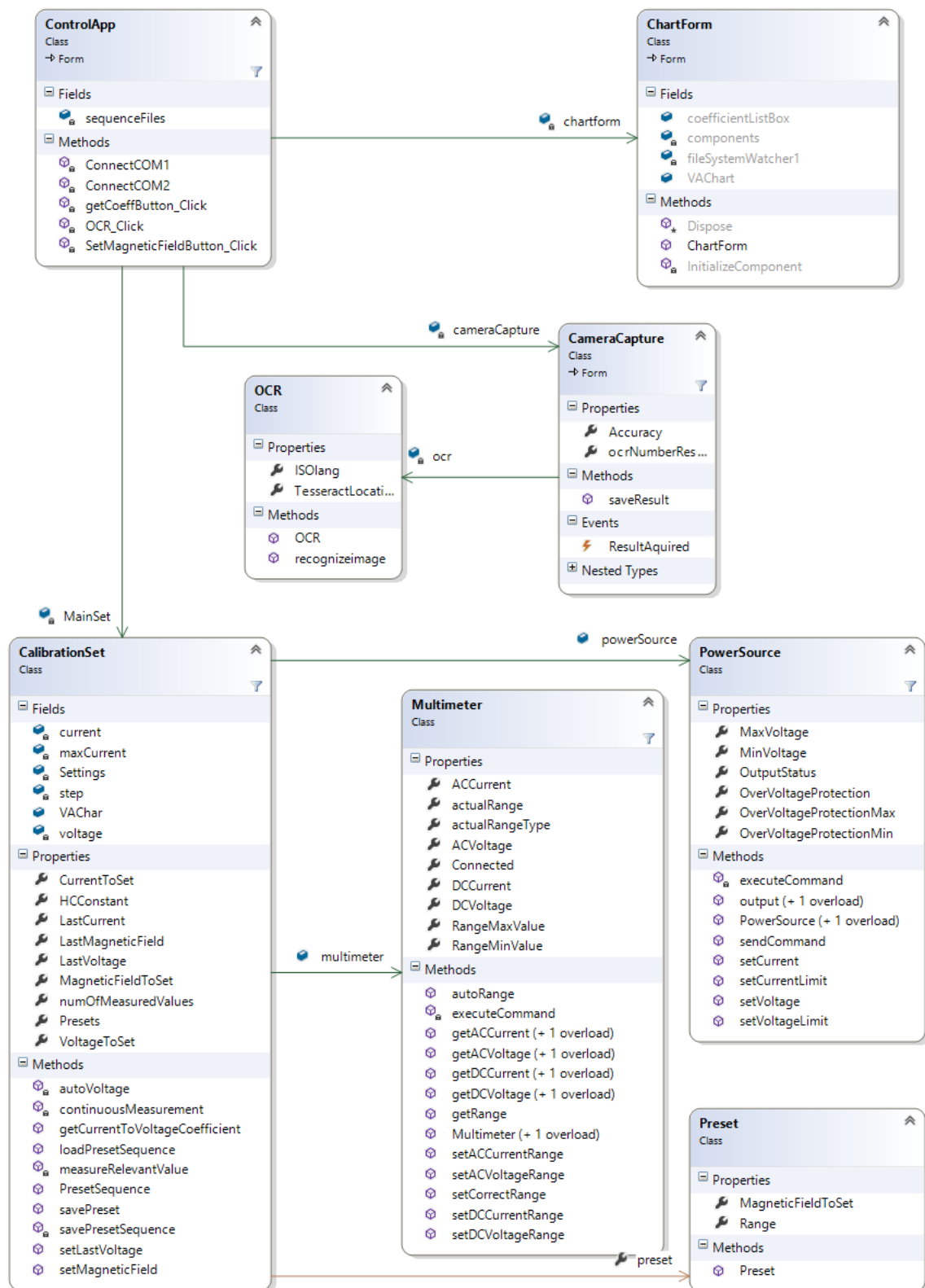
3.7 Omezení přístrojů a metody

Použité přístroje mají jistá omezení, se kterými je nutno počítat při implementaci kódu ovládací aplikace. Oba přístroje jsou připojeny přes redukce z USB na RS-232. Tyto redukce jsou cenově dostupné, proto byly pořízeny pro vývoj a testování. Předpokládá se, že redukce z USB na RS-232 způsobují zpoždění dat v řádu ms. Vzhledem k pomalé odezvě multimetru se však toto zpoždění neprojeví. Později může být pracoviště sestaveno jako jeden celek se samostatným PC vybaveným několika RS-232 rozhraními. To je však otázkou daleké budoucnosti finančního rozvoje firmy. Již při zasílání příkazů přístrojům přímo přes terminál se projevily nedostatky hardwaru. Po několika měřeních a testech se projevila pomalá odezva multimetru na vyžádání hodnot. Multimetr měří hodnoty frekvencí 2 Hz, ale předpoklad byl takový, že hodnoty dokáže přístroj odesílat okamžitě po vyžádání. Komunikační protokol multimetru pro RS-232 umožňuje i kontrolu, zda jsou již k dispozici naměřené hodnoty. Tento příkaz však zaneprázdnňuje přístroj stejně jako vyžádání hodnoty a pokud nastane na multimetru například automatická změna rozsahu, multimetr nedokáže zareagovat a nastane u něj chybový stav (oznámení pípnutím multimetru). Aplikace tak nedostane vyžádané data ani se zpožděním. Multimetr jednoduše odmítne provést požadovanou operaci. Proto jsem při tvorbě aplikace upustil od dynamického časování a

použil jsem konstantní pauzu mezi odečty 800 ms, která je dostačující pro zpoždění multimetru. Zdroj napětí je naopak velmi odolný proti rychlým sledům příkazů, avšak pokud půjde o funkci automatického nastavování napětí podle odečteného proudu, bude dostačující frekvence odečtu a nastavení 1 Hz. Celý systém je tak stejně rychlý jako nejpomalejší článek v něm. Odečítání hodnot pomocí OCR klade značné nástrahy, jako je například podobnost čísel 0 a 8 na segmentovém displeji. Tento problém však můžeme snadno vyřešit úpravou obrazu (viz část rozboru OCR). Zároveň je důležité volit kompromis mezi vysokým rozlišením snímaného obrazu z webkamery a rychlostí zpracování. Tento program bude provozován spíše na tzv. kancelářských noteboocích, proto bude dostačující webkamera s rozlišením 1280×720 px a snímaný obraz v rozlišení VGA. Dále je nutné displej měřeného přístroje řádně nasvítit pokud možno ze všech stran, aby se netvořily stíny okrajů displeje a zároveň aby se displej neleskl a měl dostatečný kontrast. To lze vyřešit jednoduchým osvětlením pomocí LED pásků používaných například ve vitrínách. Pokud bude úhel mezi displejem a LED pásky dostatečně velký, nedojde k odlesku LED ve sklíčku displeje a zároveň se prosvětlí stíny pod rámečkem. Metoda měření má omezení především v rozsahu hodnot, kterých lze dosáhnout Helmholtzovou cívkou. Pro vyšší hodnoty magnetického pole používáme v pracovním procesu elektromagnetické jho vyrobené konkrétně pro tento účel. To má bohužel nelineární křivku závislosti magnetického pole na protékajícím proudu. Elektromagnetické jho je u neakreditované kalibrace využíváno pouze občas a u akreditované kalibrace není využíváno kvůli své nepřesnosti nikdy. Proto implementace nelineární křivky pro jho nebude mým cílem. Veškerá elektronika je tepelně závislá, přestože u použitých přístrojů by měla být závislost minimální. V průběhu měření se tak může důsledkem špatného kontaktu vodičů nebo jen zahříváním cívky stát, že bude třeba hodnotu napětí na zdroji upravit. Proto by aplikace měla sama poznat tyto výkyvy a opravovat je.

4 Programová a technická realizace

Pro implementaci aplikace byl zvolen programovací jazyk C# a Windows Forms. Většina aplikace stojí především na uživatelském rozhraní aplikace a rozvržení jednotlivých komponent velmi usnadní implementaci. Uživatelské rozhraní ovládacího panelu aplikace bude přizpůsobeno průběhu kalibrace. Nejdůležitější prvky by měly být zřetelné. Jelikož je aplikace implementována v jazyce C#, navrhne si třídní diagram, který oddělí jednotlivé funkce programu. Zde (obrázek 7) je stručný návrh vazeb tříd a jejich funkcí. Hlavní formulářovou třídou bude *ControlAppForm*. Z tohoto panelu pak budeme odkazovat na jednotlivé funkce. *CameraCapture* obsahuje ovládací panel pro OCR a *ChartForm*, ve kterém bude probíhat měření VA-charakteristiky. Multimetr a DC zdroj budou oddělené třídy obsažené v třídě *CalibrationSet*, protože jde o jednotnou soustavu přístrojů použitou pro kalibraci. Každé konkrétní nastavení magnetického pole zahrnující jeho typ (AC nebo DC), druh měření (akreditované nebo neakreditované) a jednotky (A/m nebo Gauss), bude instancí třídy *Preset*, která bude využita při spouštění *PresetSequence*, neboli sekvence uložených přednastavení. Skrze tuto sekvenci pak bude řízen celý průběh kalibrace. Pro zpřehlednění a upřesnění obsahu jednotlivých tříd nahlédneme do třídního diagramu. Některé detailní proměnné a metody budou zmíněny v následujícím rozboru jednotlivých procesů. Pomocné třídy *Logger* a *CommandCreator* jsou vyjmuty z diagramu pro zpřehlednění. Kompletní diagram naleznete v příloze.



Obrázek 7: Třídní diagram

4.1 Popis tříd

CalibrationSet

Tato třída je znázorněním měřící soustavy, která bude provádět dané měření. Obsahuje *Powersource* a *Multimeter*. V případě použití jiného multimetru nebo zdroje asi bude nutné upravit některé příkazy, ale rozhodně bude zásah do kódu minimalizován. V nejbližších pěti letech však toto nebude nutné. *CalibrationSet* obsahuje všechny potřebné property pro výpočty a správný průběh měření s použitím vícevláknového programování.

- *Current* to set – proud protékající cívkou který chceme přesně nastavit.
- *HCConstant* – přepočtová konstanta Helmholtzovy cívky.
- *LastCurrent* – poslední získaná hodnota proudu z multimetru.
- *LastMagneticField* – magnetické pole vypočtené z poslední hodnoty proudu.
- *LastVoltage* – poslední napětí nastavené na DC zdroji.
- *MagneticFieldToSet* – magnetické pole, které chceme nastavit v cívce.
- *NumOfMeasuredvalues* – počet naměřených hodnot (pro sekvenční měření).
- *VoltageToSet* – napětí které chceme nastavit (platí pro konkrétní iteraci AutoVoltage).
- *Presets* – list přednastavených hodnot - [1000 DC_Am]. Tato třída navíc obsahuje metody, díky kterým je možná automatizace.
- *AutoVoltage* – donastavuje napětí přesně tak aby bylo docíleno požadovaného proudu v cívce. Mimo to také zobrazuje vypočtené magnetické pole na ovládacím panelu.
- *ContinuousMeasurement* – cyklicky odečítá hodnotu proudu z multimetru a zobrazuje vypočtené magnetické pole na ovládacím panelu.
- *PresetSequence* – nastavuje postupně jednotlivé kalibrační body a provádí opakované vypínání a zapínání výstupu pro kontrolu nulového bodu. Tyto sekvence jsou uloženy v textových souborech a lze je ručně upravovat např. pomocí notepadu a tím vytvořit veškeré možné sekvence pro všechny druhy přístrojů.

Jsou zde obsaženy také metody, které jsou pomocné, ale zároveň zásadní pro vytvoření funkčního základu automatizace, jako jsou nalezení (vypočtení) napětí pro zdroj, měření VA-charakteristiky cívky nebo navrácení relevantní hodnoty, které ošetřuje měření AC/DC proudu a AC/DC úbytku napětí. Původní řešení metody *findVoltage* počítalo s nelinearitou a vyhledávalo hodnotu v naměřených hodnotách cívky. Toto řešení je pro Helmholtzovu cívku neefektivní, jelikož její charakteristika je lineární. Přes linearitu se projevil skok v charakteristice způsobený změnou rozsahu multimetru. proto byly vytvořeny dvě proměnné pro vypočtené koeficienty z charakteristiky. Výběr koeficientu probíhá v závislosti v jakém rozsahu bude přístroj v době měření.

Multimeter a Powersource

Tyto třídy jsou abstrakcí reálných přístrojů. Obsahují jejich parametry a metody pro ovládání všech funkcí, které potřebujeme pro automatizaci. Především se starají o správné připojení přístroje a korektní odesílání příkazů přístrojům. Pro každý příkaz je vytvořena speciální metoda, která případnou návratovou hodnotu z přístroje převede do správného formátu, se kterým lze nadále v aplikaci pracovat. Jedná se o značné zjednodušení, jelikož není nutné psát vždy přesný příkaz pro sériovou linku. Stačí pouze vyvolat metodu na daném přístroji.

Logger

Je singleton třída. Nahrazuje klasický logger obsažený v systémové knihovně *System.Diagnostics*. Byl vytvořen zvlášť kvůli možnosti odlišného chování od klasického loggeru, které však nebylo nakonec potřeba. Proto tato třída pouze zaznamenává do souboru s aktuálním datem všechny podstatné události, které v aplikaci probíhají, aby bylo možno dohledat případné chyby, které se projeví až po delším používání aplikace. Výstup tohoto loggeru můžete vidět na obrázku 8.

```
25. 1. 2017 11:42:44 - ----- Application Started -----
25. 1. 2017 11:42:44 - Autoconnect Attempt
25. 1. 2017 11:42:44 - Attempt to connect Multimeter at COM6
25. 1. 2017 11:42:46 - Successfully connected.
25. 1. 2017 11:42:46 - Attempt to connect Multimeter at COM5
25. 1. 2017 11:42:46 - Executing command: *idn?
25. 1. 2017 11:42:46 - Read from serial port: Rigol Technologies,DM3058
25. 1. 2017 11:42:46 - Read from serial port: E,DM3R161650211,01.01.00.02.01
25. 1. 2017 11:42:47 - Executing command: :MEAS:CURRE:DC 5
25. 1. 2017 11:42:47 - Successfully connected.
25. 1. 2017 11:42:47 - Autoconnect Success
25. 1. 2017 11:43:38 - Preset sequence started.
25. 1. 2017 11:43:38 - Setting magnetic field. Yoke:False
25. 1. 2017 11:43:38 - Constant: 6749,60198158419
25. 1. 2017 11:43:38 - Setting voltage: 1,80623328979084 V
25. 1. 2017 11:43:38 - Executing command: :MEAS:CURRE:DC 4
25. 1. 2017 11:43:38 - Automatic voltage stabilization started.
25. 1. 2017 11:43:38 - Executing command: :MEAS:CURRE:DC?
25. 1. 2017 11:43:38 - Preset sequence paused.
25. 1. 2017 11:47:45 - Preset sequence resumed.
25. 1. 2017 11:47:42 - Executing command: :MEAS:CURRE:DC?
25. 1. 2017 11:47:42 - Read from serial port: 1.452789E+00
25. 1. 2017 11:54:35 - Closing application
25. 1. 2017 11:54:35 - ----- Application closed -----|
```

Obrázek 8: Ukázka logu

OCR

Obstarává spouštění Tesseractu a obsahuje cestu k Tesseractu a nastavení pro zvolení potřebných jazyků (fontů) pro dosažení nejvyšší možné přesnosti a spolehlivosti rozpoznávání čísel v obrazu. Třída je využívána *CameraCapture* formem.

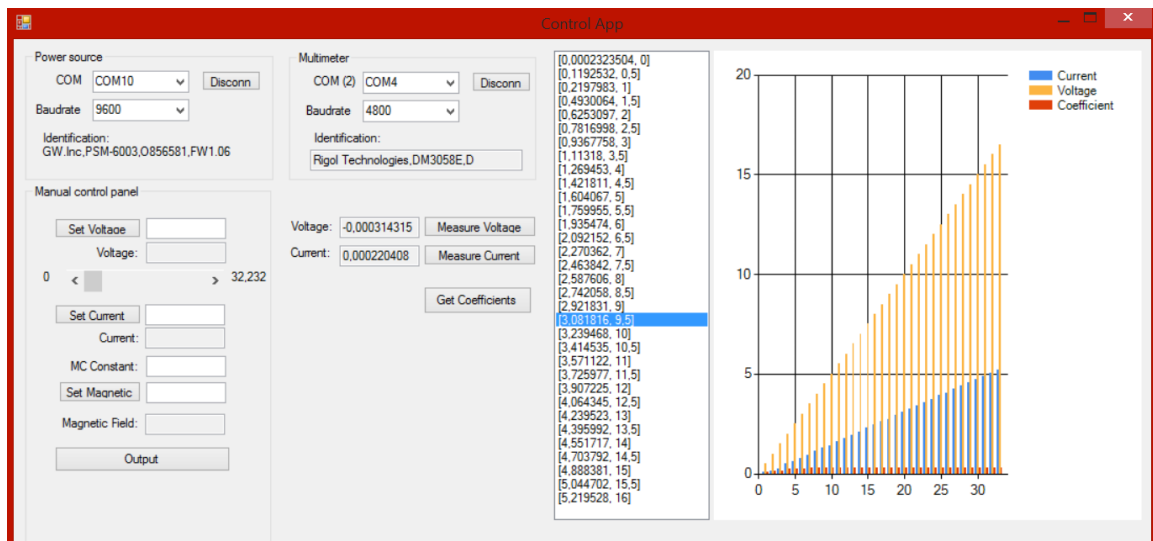
Preset

Je zaobalením nastavení pro *mainSet* (*CalibrationSet*) obsahujícím data o požadovaném magnetickém poli, zda je kalibrace akreditovaná a nebo neakreditovaná, zda se jedná o měření stejnosměrného nebo střídavého magnetického pole a v jakých jednotkách je toto pole měřeno.

- $[4000DCA_m]$ – 4000 A/m měřeno na DC rozsahu v jednotkách A/m
- $[10000AKRACGauss]$ – 10000 A/m měřeno akreditovaně na AC rozsahu v jednotkách Gauss
- $[18000AKRDCA_m]$ - 18000 A/m měřeno akreditovaně na DC rozsahu v jednotkách A/m

4.2 Uživatelské rozhraní

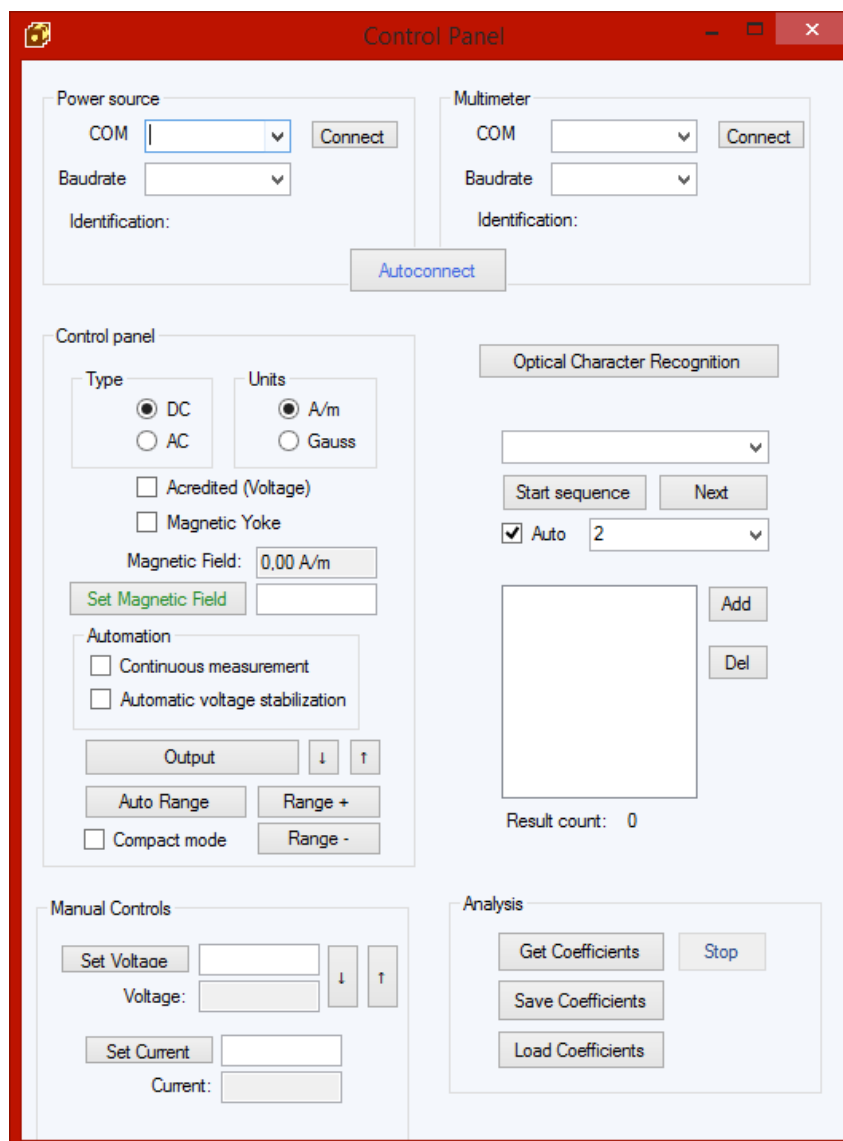
Uživatelské rozhraní softwarové aplikace *ControlPanel* bylo navrhováno společně s tvorbou funkcí aplikace. To mělo za následek mnoho zásadních změn v průběhu vývoje a testování aplikace v provozu. Prvotní GUI z obrázku 9 obsahovalo základní funkce pro nastavení napětí a odečítání hodnot z multimetru odděleně. Graf v pravé části GUI znázorňuje VA charakteristiku Helmholtzovy cívky. Celý panel byl však i s charakteristikou zbytečně široký. Proto se posléze charakteristika přenesla do zvlášť otevíraného okna, které lze po proměření znovu uzavřít. Finální podoba na obrázku 10 se značně liší od původního návrhu určeného především pro otestování jednotlivého ovládání přístrojů. Podstatnou změnou bylo utřídění levé části ovládacího panelu, která nyní obsahuje pouze zvolení typu kalibrace, měřených jednotek, nastavování magnetického pole a potřebné ovládání multimetru a zdroje. Navíc přibyla funkce krokového nastavení napětí na zdroji pro jakékoliv ruční měření nebo jinou potřebu. Šipky nahoru a dolů tedy dokáží přesně nastavit napětí na zdroji. Při delším podržení postupně se rychlost změny napětí postupně zvyšuje, aby bylo možné nastavit hodnotu jak přesně tak hrubě. v pravé části GUI pak úplně zmizelo ruční odečítání z multimetru a bylo nahrazeno ovládáním sekvenčního měření. Celý graf VA charakteristiky pak nahrazuje část Analysis v pravém dolním rohu. Pro absolutní zjednodušení a minimalizování počtu ovládacích prvků na panelu lze využít checkboxu Compact Mode, který aplikaci omezí pouze na zobrazení části Control panel.



Obrázek 9: Původní ovládací panel

4.2.1 Tvorba loga

Logo aplikace by mělo být snadno rozpoznatelné a mělo by znázorňovat něco z reálného světa samotné kalibrace. Aby logo bylo dostatečně zřetelné a zároveň neobsahovalo zbytečně moc barev a detailů bylo potřeba vybrat jednoduchý a specifický předmět. Tím se stala Helmholtzova



Obrázek 10: Nový ovládací panel

cívka. Její konstrukce je tvořena třemi textitovými přepážkami, které jsou v logu hnědé. Dále pak cívku specifikují dvě krytá vinutí, které díky papírovému krytí získala barvu světle žlutou. Poté byl přidán jednoduchý obrys a logo na obrázku 11 bylo na světě.



Obrázek 11: Ikona aplikace

4.3 Funkce aplikace

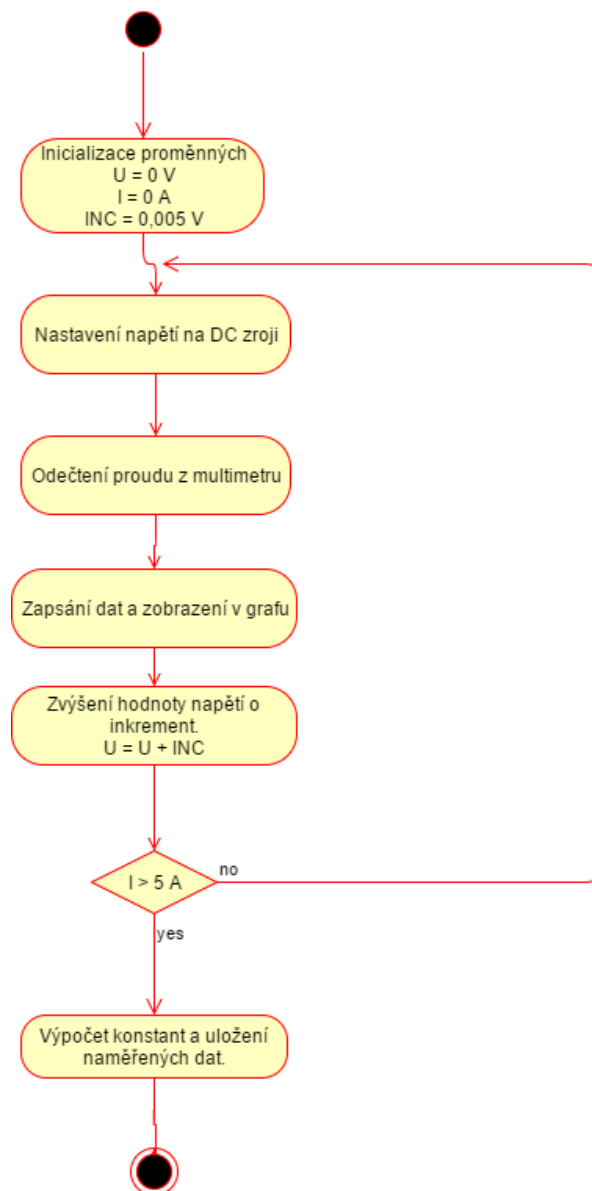
Hlavní funkcí, na které spočívá chod celé aplikace, je přesné automatické nastavení proudu protékajícího cívkou. Aby tato funkce mohla spolehlivě fungovat a nebyla ovlivněna například přechodovým odporem kontaktů vodičů, nebo okolním magnetickým polem a změnami vlastností cívky následkem stárnutí a únavy materiálu, je potřeba využít oba připojené přístroje. Nastavením napětí na DC zdroji lze korigovat proud protékající cívkou. Závislost magnetického pole v cívce na protékajícím proudu lze zjistit z kalibračního listu Helmholtzovy cívky. Přímé nastavení proudu na DC zdroji však není dostatečně přesné. Nastavuje se tedy napětí, jehož závislost na proudu je nutné vypočítat z odporu cívky a provedením volt-ampérové charakteristiky.

4.3.1 Měření VA charakteristiky

Toto měření bude probíhat v cyklu s určitou rychlostí stoupání napětí na zdroji. Volt-Ampérová charakteristika bude provedena pouze pro proudový rozsah 0 – 5 A, jelikož vyšší hodnoty proudu nejsou pro kalibraci potřeba a stabilizátor napětí, na němž je DC zdroj připojen, ani vyšší proudy stabilizovat nedokáže. Po ukončení cyklu metoda projde všechny zaznamenané hodnoty, vypočítá aritmetický průměr napětí a proudu a pomocí Ohmova zákona z těchto dvou hodnot získá odpor celého měřicího zapojení a především Helmholtzovy cívky. Toto měření lze pak aplikovat na úpravu přepočtových koeficientů pro výpočet nastavitelného napětí pro všechny druhy měření (akreditované / neakreditované). S těmito konstantami lze nyní pracovat a nastavovat přibližnou hodnotu magnetického pole v cívce.

4.3.2 Metoda AutoVoltage

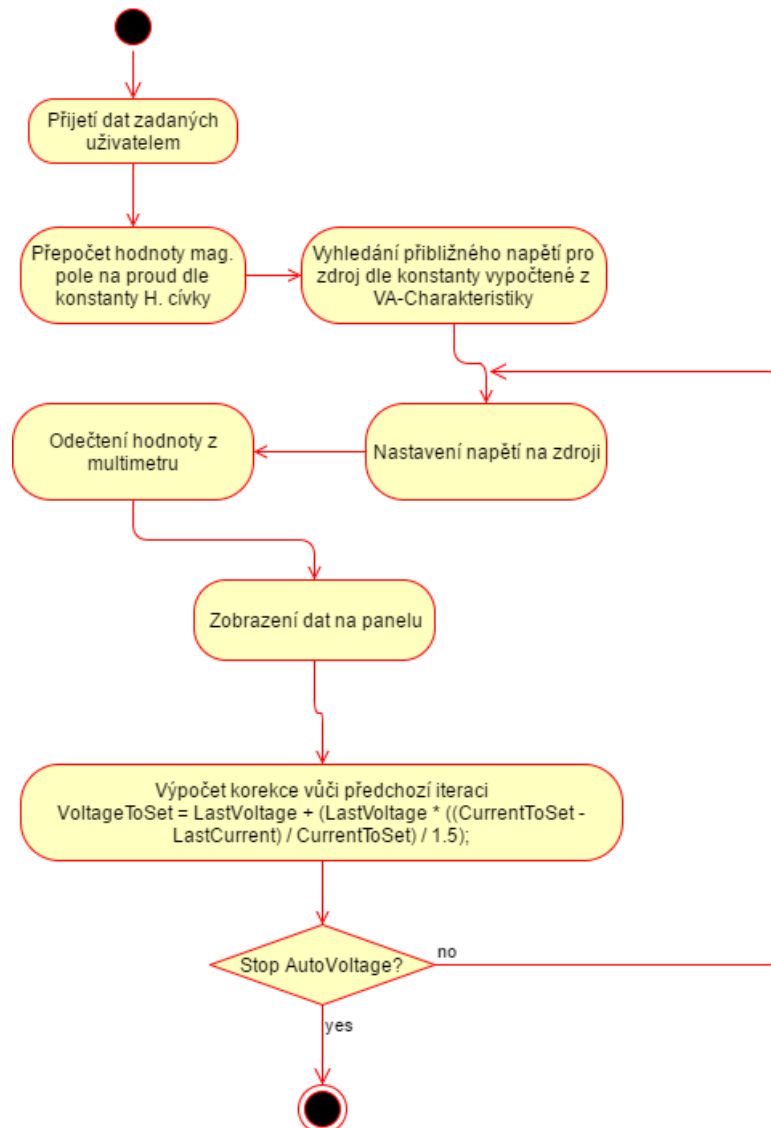
Aplikace by po vložení údaje o požadovaném magnetickém poli (např. 4000 A/m) a potvrzením nastavení měla dle vypočtených konstant nastavit přibližnou hodnotu napětí na DC zdroji. Tato hodnota se však může měnit v závislosti na zahřívání cívky elektrickým proudem a proto je nutné dostavit přesný proud dle konstanty Helmholtzovy cívky z jejího kalibračního listu (6749,60198158419 pro neakreditovanou metodu). Z tohoto koeficientu získáme přesný proud 0,59262753728497 A, který bude cílem nastavení. Metoda, která bude spuštěna ve svém vlastním vlákne, nejprve nastaví přibližnou hodnotu podle koeficientu a poté podle skutečného proudu sníží nebo zvýší napětí na zdroji. Zdálo by se ideální použít metodu půlení intervalu, ale vzhledem k prodávám měřících přístrojů by docházelo k nekontrolovatelnému kolísání. V případě, že by aplikace předpokládala již nastavený proud a multimetr poslal data z posledního měření, která jsou mnohem nižší, jelikož se měření ještě neustálilo, korekce by byla zbytečně velká a způsobila by další výkyvy (což bylo ověřeno). Proto je zapotřebí, aby metoda ignorovala hodnoty z neustáleného měření do určité tolerance. Tato tolerance byla nastavena po několika zkouškách na 0,07 V oproti poslední nastavené hodnotě. To znamená, že pokud by musela metoda způsobit korekci větší než je 0,07V na DC zdroji, přeskočí jednu iteraci se zpožděním.



Obrázek 12: Vývojový diagram měření VA charakteristiky

4.3.3 Metoda ContinuousMeasurement

Další důležitou metodou pro práci s aplikací je metoda kontinuálního měření. *ContinuousMeasurement* bude spuštěna po prvotním přesném nastavení hodnoty, nebo při odpojení výstupu DC zdroje. Aby nedocházelo k posunu kalibračního bodu, další měření budou probíhat pouze s vypínáním a zapínáním výstupu. Tuto metodu lze posléze využít pro kalibraci AC rozsahu, jelikož mechanický autotransformátor nelze připojit k RS-232. Tato metoda si pouze vyžádá naměřená data od multimetru a přepočítá je na magnetické pole. Tím se zjednoduší odečet nastavené hodnoty a zvýší se její přesnost. Tato metoda nemůže být spuštěna společně s metodou automatického nastavení napětí, jelikož ta si také žádá data z multimetru, který však není schopen poskytovat

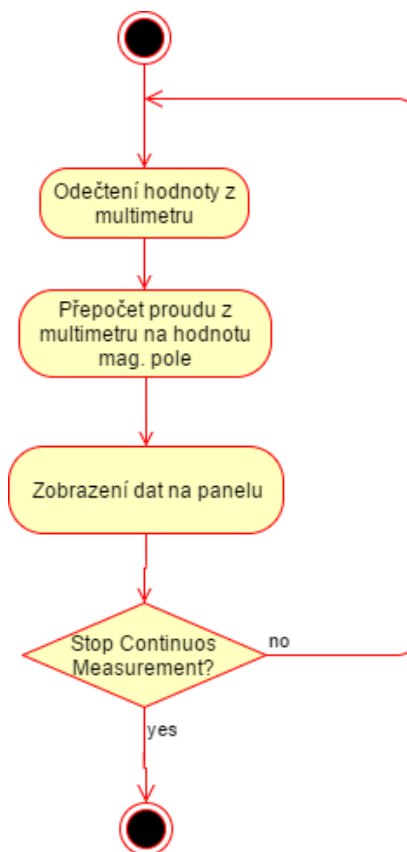


Obrázek 13: Vývojový diagram Auto Voltage

data v krátkých intervalech (<500 ms). Zdálo by se, že lze tento problém ošetřit kontrolou, zda již multimetr odeslal data, avšak požadavek „data aquired“ je multimetrem odmítnut stejně jako požadavek o naměřená data. Proto je tuto situaci nutné řešit pouhou prodlevou 800 ms. Metody *ContinuousMeasurement* a *AutoVoltage* budou synchronizovány tak, aby se nikdy nekryly. Toto opatření je naprogramováno přímo v logice chování ovládacího panelu.

4.3.4 Metoda PresetSequence

Tato metoda bude provádět nastavování jednotlivých kalibračních bodů a opakování jejich měření. Lze ji používat i bez kombinace s OCR, pouze pro zjednodušení vstupů uživatele do měřicího procesu. „Presety“ uložené v textovém souboru (kvůli manuálním úpravám mimo pro-



Obrázek 14: Vývojový diagram Continuous Measurement

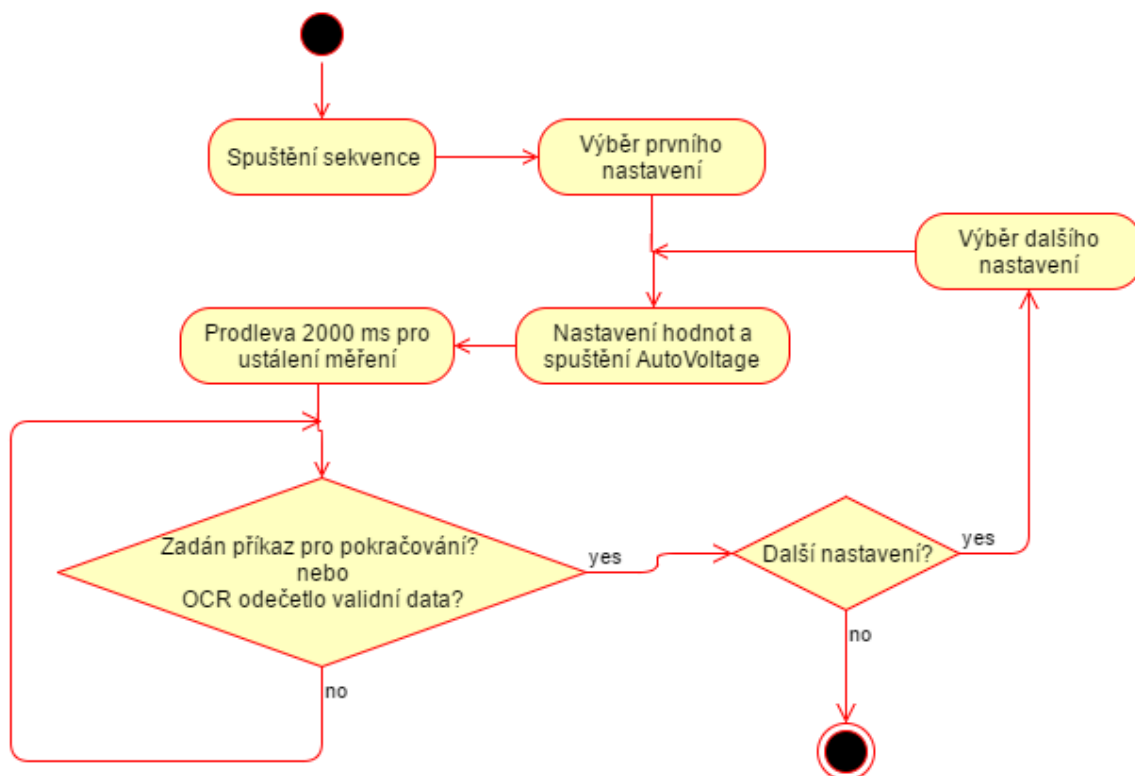
gram) budou načteny do *Listu* a z něj pak přehrávány. Pro každý přístroj lze sepsat vlastní *PresetSequenceFile*, který bude obsahovat všechny body kalibrace.

4.3.5 Kombinace metod DoOCR a PresetSequence

Kombinace těchto dvou metod, při využití eventy *ResultAcquired* vytváří z aplikace kompletně automatizovaný systém. Po správném nastavení kontrastu, thresholdu a ořezu obrazu pro OCR, zaznamená Tesseract číslo, které je pak schopen převést do klasického číselného formátu. Vyvolá se event *ResultAcquired*. Následně je ověřeno, zda je výsledek číslo, zda je relevantní a zda vyhovuje určené toleranci měření. Po těchto kontrolách je výsledek zapsán do souboru naměřených hodnot a zároveň je uložen obrázek pro dodatečnou kontrolu správnosti měření. Naměřené hodnoty v souboru můžete vidět na obrázku 25.

4.3.6 CameraCapture (Form)

Toto okno se otevírá navíc a je ovládacím panelem pro nastavení obrazu kamery a OCR. Náhled lze vidět na obrázku 16.



Obrázek 15: Vývojový diagram Preset Sequence

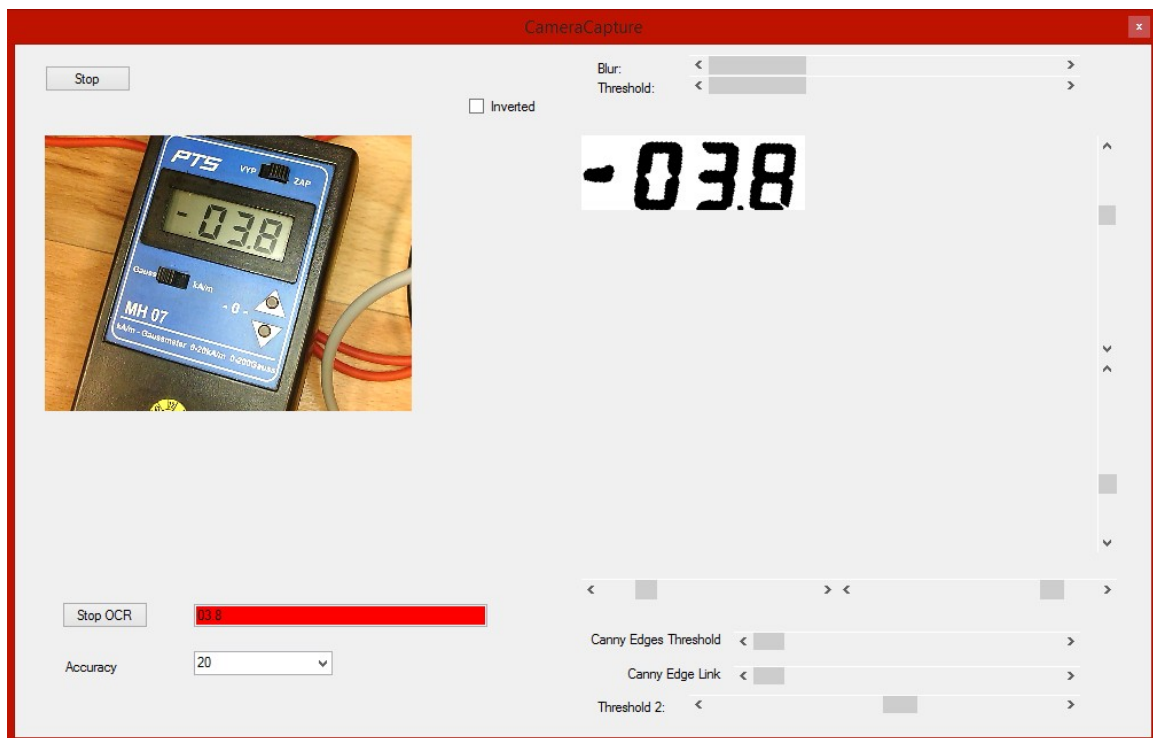
4.4 Zpracování obrazu

Při každém sejmutí snímku z kamery proběhne jeho preprocessing pro OCR a pro automatické dorovnání a ořezání obrazu. Knihovna Emgu nabízí základní funkce pro připojení kamery a úpravu obrazu právě pro OCR. Z kamery získáme snímek s rozlišením (640×480) px. Lze jej vidět na obrázku 17. Vyšší rozlišení je pro naše použití zbytečné a bylo by náročné na zpracování.

Originální snímek z kamery nejprve pomocí funkce *Pyr Down* zmenšíme na polovinu rozlišení (320×240) px. Poté znova zvýšíme rozlišení na původních (640×480) px. Tímto se v obraze interpolací ztratí detaily, které nepotřebujeme a šum webkamery. Výsledek vidíme na obrázku 18.

Pro potřeby optického rozpoznávání znaků potřebujeme obraz pouze dvoubarevný (černo-bílý). Proto použijeme funkci *AdaptiveThreshold*. Tato funkce transformuje obraz ve stupních šedi na binární snímek. Práh je vypočítáván pro každý pixel individuálně [3]. To zjednodušeně znamená, že pro každý pixel je vypočítána průměrná hodnota jasu okolních pixelů z daného čtverce kolem pixelu a poté je rozhodnuto zda bude hodnota pixelu 0 nebo 1. Výsledek tohoto procesu je velmi podstatný a můžeme jej vidět na obrázku 19.

Teď máme tedy připravený snímek, který je téměř vhodný pro zpracování Tesseractem. Obsahuje ale mnoho zbytečných obrazců, které Tesseract nedokáže rozpoznat. Proto musíme ořezat obraz přesně podle displeje snímaného přístroje. Využijeme znovu předchozí snímky k nalezení



Obrázek 16: Okno CameraCapture



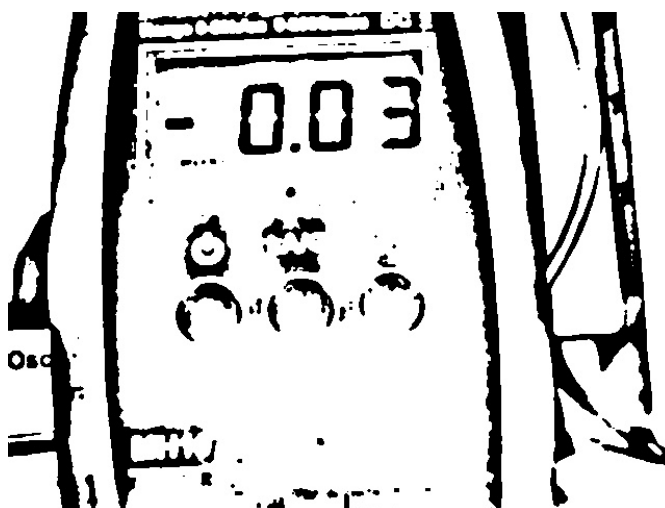
Obrázek 17: Originální snímek z webkamery

obdélníku (rámečku displeje). Z vyhlazeného snímku ve stupních šedi (obrázek 18) získáme snímek zvýrazňující hrany objektů. K tomu využijeme funkci *CannyEdges*, která zvýrazní kontrastní přechody v obraze. Výsledek vidíme na obrázku 20.

Nyní přichází proces hledání displeje. Metodou *FindContours* najdeme obrysy v obraze a převedeme je na vektory, které poté aproximujeme metodou *ApproxPolyDP*. Díky metodě *ContourArea* zjistíme vnitřní plochu nalezeného obrysu. Pro tento případ jsme si určili kon-

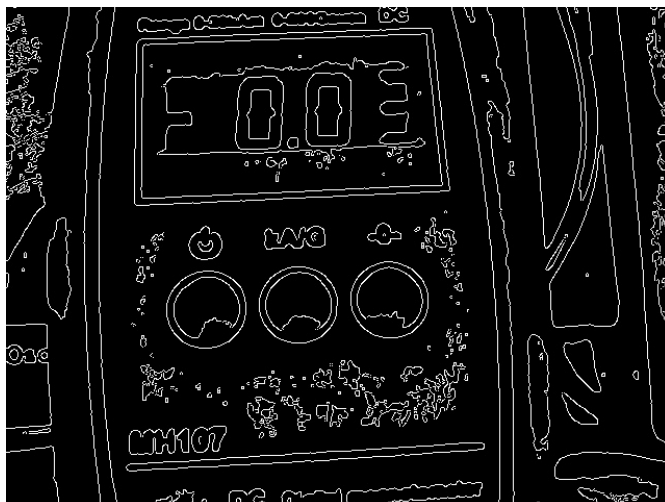


Obrázek 18: Vyhlazený snímek převedený do stupňů šedi



Obrázek 19: Snímek zpracovaný funkcí AdaptiveThreshold

stantu 20000 px pro minimální plochu hledaného obdélníku. Pokud je podmínka 20000 px splněna, pokračujeme dále v hledání. Parametr Size aproximované kontury určuje kolik má hran. Pro obrysy, které mají počet hran 4 tedy můžeme pokračovat dále s rozlišováním čtyřhranu. Pokud jsou jednotlivé úhly čtyřhranu od 80° do 100° , lze předpokládat, že nalezený obrys je obdélníkem. Pokud jsme správně nastavili kameru proti měřenému přístroji, bude první nalezený obdélník právě obrys displeje přístroje. Proto není potřeba zbytečně zatěžovat procesor a v tomto bodě můžeme proces hledání ukončit a nalezený obdélník použít pro ořezání binárního snímku.



Obrázek 20: Snímek zpracovaný metodou CannyEdges

```
private List<RotatedRect> findRectangle(UMat cannyEdges){
    List<RotatedRect> boxList = new List<RotatedRect>();
    using (VectorOfVectorOfPoint contours~= new VectorOfVectorOfPoint()){
        CvInvoke.FindContours(cannyEdges, contours, null, RetrType.List,
            ChainApproxMethod.ChainApproxSimple);
        int count = contours.Size;
        for (int i = 0; i < count; i++) {
            using (VectorOfPoint contour = contours[i])
            using (VectorOfPoint approxContour = new VectorOfPoint()){
                CvInvoke.ApproxPolyDP(contour, approxContour, CvInvoke.
                    ArcLength(contour, true) * 0.1, true);
                if (CvInvoke.ContourArea(approxContour, false) > 20000){
                    if (approxContour.Size == 4){
                        bool isRectangle = true;
                        Point[] pts~= approxContour.ToArray();
                        LineSegment2D[] edges~= PointCollection.PolyLine(pts
                            , true);
                        for (int j = 0; j < edges.Length; j++){
                            double angle = Math.Abs(edges[(j + 1) % edges.
                                Length].GetExteriorAngleDegree(edges[j]));
                            if (angle < 80 || angle > 100){
                                isRectangle = false;
                                break;
                            }
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}
```

```

    }

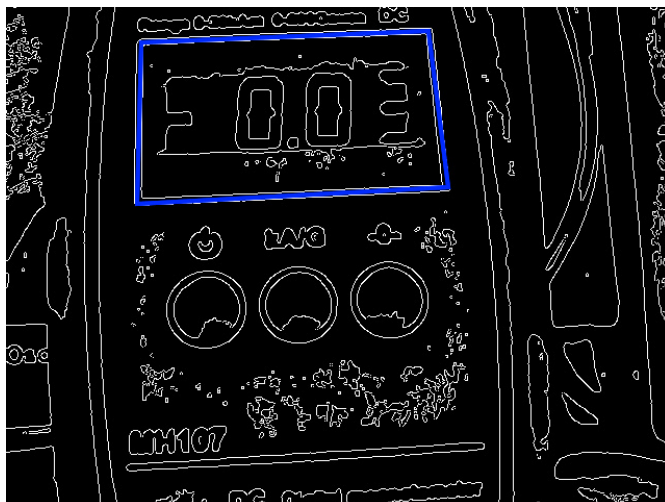
    if (isRectangle){
        boxList.Add(CvInvoke.MinAreaRect(approxContour))
        ;
        return boxList;
    }
}
}
}
}
}
return boxList;
}

```

Tento obdélník většinou nebude natočený přesně horizontálně a je třeba celý snímek dorovnat. Otočení snímků je snadné. Použitím metody Rotate otočíme snímek o záporný úhel natočení obdélníku a zbytek obrazu vyplníme bílou barvou. Tímto se nám ale obdélník (display) posune z původní pozice jinam a ztrácíme tak informaci o jeho pozici. Vypočtení nové polohy obdélníku po otočení snímku by bylo možné pomocí transformačních matic a rotace kolem obecného bodu. Pro náš případ je však mnohem jednodušší využít převod na polární souřadnice. Střed původního snímku a pootočeného snímku s doplněným volným prostorem je vždy stejný, proto jej zvolíme jako střed polárního souřadnicového systému. V originálním snímku nalezneme obdélník a zaznameneáme si jeho středovou polohu v kartézských souřadnicích. Poté zjistíme polohu vůči středu obrazu. Z těchto souřadnic pak vypočítáme pomocí rovnice 4 poloměr r a zároveň s využitím rovnice 3 úhel natočení přímky poloměru. z parametrů zjistíme úhel natočení nalezeného obdélníku a snímek otočíme opačným směrem. Úhel natočení přímky poloměru z polárních souřadnic přičteme k úhlu otočení snímku, a tím získáme novou přesnou polohu středu obdélníku. Poté stačí pouze převést polární souřadnice zpět na kartézské souřadnice a máme k dispozici přesnou pozici středu obdélníku v pootočeném snímku. Z parametrů obdélníku zjistíme jeho šířku a výšku a tyto údaje společně s doladěním ořezu pomocí posuvníků v aplikaci použijeme pro obdélníkový výřez z pootočeného černobílého snímku na obrázku 19. Tento výřez (obrázek 22) pak použijeme přímo k OCR.

$$arctan2 = \left\{ \begin{array}{l} \arctan(\frac{y}{x})je - li(x > 0) \wedge (y \geq 0) \\ \arctan(\frac{y}{x}) + \pi je - li(x < 0) \\ \arctan(\frac{y}{x}) + 2\pi je - li(x > 0) \wedge (y < 0) \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$r = \sqrt{x^2} + \sqrt{y^2}, \varphi = arctan2(x, y) \quad (4)$$



Obrázek 21: Snímek s nalezeným obdélníkem



Obrázek 22: Výřez snímku pro OCR

4.5 Zpracování obrazu pomocí Tesseract OCR

*Tesseract je open source engine pro rozpoznávání znaků. Může být použit přímo a nebo jako API pro čtení ručně psaného nebo tisknutého textu z obrázků. Podporuje velkou škálu jazyků. Tesseract nemá žádné vestavěné GUI, ale lze je nalézt na různých 3rdParty webech [4]. Pro naše potřeby využijeme jednoduchého spuštění *.exe souboru bez zobrazení příkazové řádky. Pro pracovní soubory vytvoříme novou podsložku *OCR*, která bude obsahovat jak dočasné snímky určené pro zpracování tak zpracované snímky s popisem o nalezeném čísle. Vzhledem k tomu, že naše použití nevyžaduje standardní textové fonty, tyto pak nebudou použity. Je ale nutné „naučit“ Tesseract nové písmo, kterým bude řada číslic ze segmentového displeje. Pro usnadnění práce použijeme k vytváření tzv. Boxů v TIFF obrázcích program jTessBoxEditorFX [4] a pro „učení“ Tesseractu novým fontům program Serak Trainer For Tesseract 3.0X [5]. Složku s „naučeným“ Tesseract pak přidáme do složky aplikace. Z počátku bude využito dvou typů fontů. Některé displeje mají segmenty blíže a některé dále od sebe. S tím musí aplikace počítat a znát oba tyto typy. Pro Tesseract je mnohem jednodušší rozpoznávat propojené číslice než oddělené segmenty. První typ písma je true type font Segment7. Při generování TIFF souboru pro vytvoření předlohy pro Tesseract však docházelo k neidentifikovatelné chybě, kterou nebylo možné nikde dohledat. Po dlouhém testování jsem objevil nepravidelnost výřezů jednotlivých znaků v Box Editoru. To mělo za příčinu neschopnost programu Serak Trainer vytvořit soubor *normproto*, který je pro*

„naučení“ nových fontů zásadní. Po ruční úpravě „boxů“ v Box Editoru tak, aby jejich velikost byla stejná, bylo možné provést celý proces učení fontu. Náhled znaků v tomto fontu můžete vidět na obrázku 23.

A digital font display showing the digits 0 through 9, a hyphen, and two special characters. The characters are sharp and well-defined.

Obrázek 23: Ostrý font

Druhý typ písma je rozostřený Segment7 určen pro propojené segmentové displeje a rozmazaný snímek z kamery. Tento font je spolehlivější jelikož Tesseract dokáže lépe rozpoznat podobné číslice jako jsou například 3 a 9 a nebo 0 a 8. Při generování *TrainData* pro Tesseract jsem se tentokrát vyhnul chybě způsobené různými boxy a „učení“ proběhlo hladce. Pro představu shlédněte obrázek 24.

A digital font display showing the digits 0 through 9, a hyphen, and two special characters. The characters are blurred and have a segmented appearance, typical of a low-resolution display or a camera snapshot.

Obrázek 24: Rozmazaný/propojený font

4.5.1 Spouštění Tesseractu

Spouštění Tesseract probíhá v metodě *recognizeImage* přes třídu *ProcessStartInfo*, u které musíme nastavit hlavní parametry spouštění, jako jsou: cesta k *tesseract.exe*, cesta ke zpracovávanému snímku a použité jazyky.

```
ProcessStartInfo processInfo = new ProcessStartInfo();
    processInfo.UseShellExecute = false;
    processInfo.WorkingDirectory = "../" ;
    processInfo.CreateNoWindow = true;
    String lang = "";
    for (int i = 0; i < ISOlang.Count(); i++) {
        if (i > 0) lang += "+";
        lang += ISOlang[i];
    }
    processInfo.Arguments += " \"" + imagepath + "\" \"" + imagepath.
        Substring(0, imagepath.LastIndexOf('\\')) + "\\output\" -l " +
        lang;
    processInfo.FileName = TesseractLocation + '\\\' + command;
    Logger.Instance.AddLog("Starting tesseract");
    Process~p = Process.Start(processInfo);
```

Výsledek je uložený v souboru *output.txt*. Přečteme jej pomocí třídy *StreamReader* a uložíme jako řetězec.

4.5.2 Zpracování výsledků

Řetězec navracený metodou *recognizeImage* nejprve převedeme na číslo formátu *double*. Tuto operaci uzavřeme do bloku *try – catch*. Pokud převod vyhodí výjimku, znamená to, že text není pouze číslo a nebude dále ověřován. Pokud převod čísla proběhne pokračujeme v kontrole dále. Číslo musí být aspoň přibližně stejné jako hodnota magnetického pole, která je nastavena na cívce. Pokud je hodnota příliš odlišná, nepočítá se jako relevantní. Pokud hodnota odpovídá předpokladu, zapíše se společně s nastavenou hodnotou do *.csv dokumentu a zároveň jako snímek pojmenovaný zjištěnou hodnotou. Díky těmto snímkům lze ověřit správnou funkčnost. Mezi každým měřením musí proběhnout kontrola nulového bodu. Aplikace vypne výstup zdroje a čeká na ustálení hodnoty na displeji přístroje. Pokud je poté hodnota blízká nule v rozsahu 0,04 kA/m hodnotu zaznamená a po opětovném zapnutí výstupu zdroje tuto hodnotu zohlední ve výsledku měření.

5 Testování činnosti jednotlivých přístrojů

V první verzi aplikace, kterou můžete vidět v části Uživatelské rozhraní, bylo implementováno rozhraní pro samostatné ovládání přístrojů z ovládacího panelu. Bylo rozděleno na měření multimetrem AC/DC proudu a napětí a nastavování proudu a napětí zdroje.

5.1 Zdroj napětí a proudu

Po vepsání hodnoty do vstupní buňky pro nastavení napětí zdroje a stisknutí tlačítka *SetVoltage* bylo nastaveno napětí na zdroji téměř okamžitě a poté bylo pro kontrolu přijato info o nastaveném napětí zdroje. Stejný proces byl použit i pro nastavení proudu. Těmito testy byla ověřena rychlost, s jakou lze počítat při samostatné práci aplikace, při určité přesnosti a spolehlivosti.

5.2 Multimetr

Měření multimetrem probíhalo ve čtyřech buňkách. Každá buňka měla zprvu své tlačítko a ovládalo se jím čtení hodnoty naměřené multimetrem. Zde se ukázalo velké zpoždění navrácení hodnoty z multimetru. To může být následkem použití redukce USB na RS-232. Při dostatečném zpoždění však multimetr navracel hodnoty spolehlivě a přesně.

6 Testování celého kalibračního pracoviště

K testování celého kalibračního pracoviště s automatizací je již využíváno nového GUI, které obsahuje i OCR panel. Po provedení zapojení celého obvodu, včetně připojení multimetru, zdroje a kamery k počítači je nutno nasměrovat kameru proti displeji měřeného přístroje. Spustíme aplikaci *ControlPanel*, nastavíme parametry měření, jako jsou jednotky, typ proudu, typ kalibrace, počet kalibračních bodů a typ měřeného přístroje. V aplikaci otevřeme pomocí tlačítka *OpticalCharacterRecognition* nové okno s ovládacími prvky pro rozpoznávání znaků a spustíme snímání obrazu pomocí tlačítka *Capture*. Pokud byl ve snímku nalezen obrys displeje, provedeme jemné doladění obrazu pomocí posuvníků tak aby bylo na snímku zřetelné pouze zobrazené číslo na displeji. Stiskneme *Startsequence* a *StartOCR*. Aplikace nastaví první hodnotu na zdroji a odečte hodnotu z displeje. Díky nepřesnostem ve snímku může dojít ke zkreslení jednotlivých číslic a tak nemusí aplikace správně rozpoznat číslo. Pokud je rozpoznané číslo příliš odlišné od předpokládaného výsledku, aplikace bude tento výsledek ignorovat a bude opakovat měření. Nastaly však i takové situace, kdy nebyl rozpoznán vůbec žádný znak v obraze a prozatím nebylo zjištěno co to způsobilo. Předpokládám, že chyba se stala díky nedostatku různých naučených fontů v Tesseract. Výsledky měření jsou pak pro kontrolu uloženy i jako snímky s názvem generovaným z naměřené hodnoty. Zároveň je vytvořen celý soubor s naměřenými hodnotami a jejich etalonovými vzory. Formátování výstupu je zřetelné na obrázku 25. Pro otestování správnosti výsledků bylo prováděno paralelní odečítání hodnot z displeje pracovníkem a odečítání aplikací. Po hodině měření a přes 600 naměřených hodnotách se neprojevovala téměř žádná chybovost. Největší chyba se vždy projevila při přechodu zobrazeného čísla na jiné číslo. Tyto čísla však byla vyhodnocena jako chybná a nebyla zapsána do výsledku. V souboru s naměřenými hodnotami se vypsaly pouze správné hodnoty. K většímu ověření dojde až při delším testování v rámci provozu.

6.1 Porovnání

Původní postup kalibrace byl časově náročný, jak kvůli zápisu hodnot na papír a následnému přepisování, tak kvůli nastavování jednotlivých kalibračních bodů ručně a celkově ručnímu měření. Nyní je měření plně automatizováno a naměřené hodnoty se rovnou zapisují do počítače. Jako srovnávací příklad použijeme přístroj s jedním DC rozsahem.

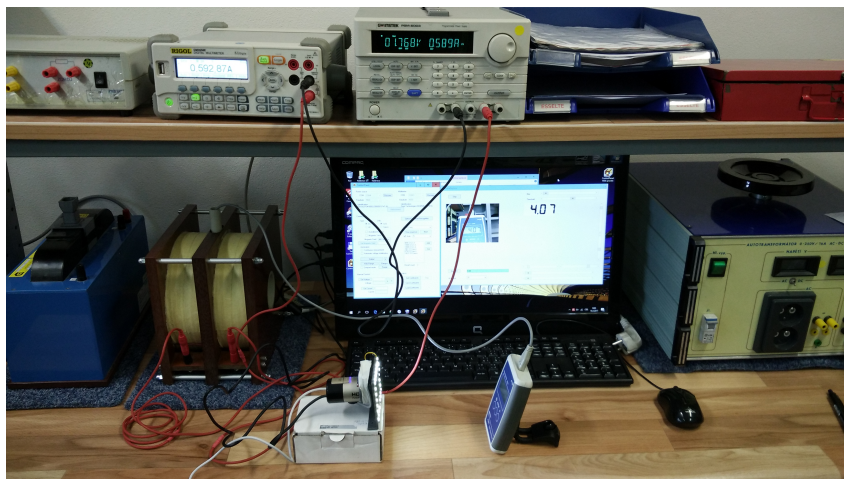
- Připravíme přístroje a zapojení a zapíšeme údaje o přístroji - 5 ~ 10 minut.
- Postupně nastavíme jednotlivé body kalibrace. Jeden bod trvá 1 ~ 2 minuty, 6 ~ 12 minut celkem.
- Postupně proměříme každý měřený bod pětkrát a zapíšeme naměřenou hodnotu. Pro jednu hodnotu je to přibližně 30 sekund i s kontrolou nulového bodu. Celkem měříme 30 hodnot - 15 minut.

Hodnota magnetického pole:	4,01858680227817	Naměřená hodnota:	3,98
Hodnota magnetického pole:	4,01858680227817	Naměřená hodnota:	3,98
Hodnota magnetického pole:	4,01881561378535	Naměřená hodnota:	4,02
Hodnota magnetického pole:	4,01881561378535	Naměřená hodnota:	4,02
Hodnota magnetického pole:	4,01877376625306	Naměřená hodnota:	4,02
Hodnota magnetického pole:	4,01887636020318	Naměřená hodnota:	4,02
Hodnota magnetického pole:	4,01882843802911	Naměřená hodnota:	4,02
Hodnota magnetického pole:	4,01865429829799	Naměřená hodnota:	4,02
Hodnota magnetického pole:	4,0189067334121	Naměřená hodnota:	4,02
Hodnota magnetického pole:	10,0163485942531	Naměřená hodnota:	10
Hodnota magnetického pole:	10,0163485942531	Naměřená hodnota:	10
Hodnota magnetického pole:	10,0163485942531	Naměřená hodnota:	9,99
Hodnota magnetického pole:	10,0163485942531	Naměřená hodnota:	9,99
Hodnota magnetického pole:	10,0060622008332	Naměřená hodnota:	10
Hodnota magnetického pole:	10,0060554512312	Naměřená hodnota:	10
Hodnota magnetického pole:	10,0058934607836	Naměřená hodnota:	10
Hodnota magnetického pole:	10,0058934607836	Naměřená hodnota:	10
Hodnota magnetického pole:	10,0055424814806	Naměřená hodnota:	10
Hodnota magnetického pole:	10,0055424814806	Naměřená hodnota:	10
Hodnota magnetického pole:	10,0055087334707	Naměřená hodnota:	10

Obrázek 25: Výstup měření

- Přepíšeme naměřené hodnoty a údaje o přístroji z papíru do počítače společně s navázáním zakázky a vystavením a kontrolou protokolu - 30 ~ 45 minut.

Celkový čas na kalibraci je tedy 56 ~ 82 minut. Po zavedení automatizace a zápisu přímo do excel souborů nebo pouhém překopírování hodnot do souborů se kalibrace značně urychlila.



Obrázek 26: Ukázka nového pracoviště

- Připravíme přístroje a zapojení a zapíšeme do počítače údaje o přístroji - 5 ~ 10 minut.
- Spustíme aplikaci, vybereme preset pro daný přístroj, nastavíme kameru, doladíme ořezání displeje a spustíme měření - 3 ~ 5 minut.

- Aplikace proměří kladný rozsah - 3 ~ 5 minut.
- Po proměření kladné části, přepóluje cívku a spustí pokračování měření - max 1 minuta.
- Aplikace proměří záporný rozsah - 3 ~ 5 minut.
- Naměřené hodnoty přepokopírujeme do Excel souborů - 2 ~ 4 minuty.
- Zapišeme informace o zakázce a vystavíme protokol - 5 ~ 10 minut.

Celkový čas při automatizovaném měření a se započítáním času i na přepojení vodičů na cívce je v rozpětí 22 ~ 45 minut. To znamená, že i v nejhorším případě je čas na kalibraci kratší.

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo urychlit a zjednodušit proces kalibrace magnetometrů. Porovnáním původního postupu měření a nového postupu s automatizací jsme zjistili značné urychlení (viz kapitolu Porovnání). Samotné optické rozpoznávání znaků není vždy stoprocentně spolehlivé, ale pomocí ošetření v aplikaci je po kontrole až 1000 hodnot možné tvrdit, že se hodnoty naměřené aplikací neodchylují od skutečnosti. Do budoucna je v plánu rozšířit automatizaci i pro AC rozsahy. Je k tomu nutné pořídit dostatečně přesný AC zdroj a implementovat jej do aplikace buďto jako třetí přístroj, nebo místo DC zdroje. Pro přepólování cívky by pak bylo vhodné vytvořit pomocí mikropočítače přípravek, který by měnil polaritu výstupu. Proces přepólování kabelů je sice časově nenáročný, ale stále vyžaduje přítomnost kalibračního technika.

Literatura

- [1] *RIGOL Technologies, Inc.: RIGOL Programming Guide: DM3058 Multimeter* 2009.[online]. [cit. 2017-04-2]. <<https://www.rigolna.com/products/digital-multimeters/dm3000/>>.
- [2] [online]. [cit. 2017-04-15]. <http://www.gwinstek.com/en-global/products/DC_Power_Supply/Programmable_Single_Channel_DC_Power_Supplies/PSM-Series>.
- [3] [online]. [cit. 2017-04-2]. <http://www.emgu.com/wiki/index.php/Main_Page>.
- [4] [online]. [cit. 2017-04-4]. <<https://github.com/tesseract-ocr/tesseract/wiki>>.
- [5] [online]. [cit. 2017-04-5]. <<http://vietocr.sourceforge.net/training.html>>.
- [6] **ČSN EN ISO 9934-1 (015046)***Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení magnetickou práškovou metodou - Část 1:Všeobecné zásady* Praha: Český normalizační institut, 2002
- [7] **ČSN EN ISO 9934-2 (015046)***Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení magnetickou práškovou metodou - Část 2:Zkušební prostředky* Praha: Český normalizační institut, 2002
- [8] **ČSN EN ISO 9934-3 (015046)***Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení magnetickou metodou práškovou - Část 3:Přístroje* Praha: Český normalizační institut, 2003
- [9] **Kalibrační postup pro kalibraci přístroje č. 04-53/32: DIGITÁLNÍ MĚŘIČ INTENZITY MAGNETICKÉHO POLE** Ostrava: PTS Josef Solnař s.r.o., 2010 - interní závazný dokument